



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Elèctrica

GESTIÓ DE RECURSOS DISTRIBUÏTS A LA XARXA DE BAIXA TENSIÓ



Memòria i Annexos

Autor:	Josep Bartomeu Pons Fiol
Director:	Francesc Girbau Llistuella
Convocatòria:	Juny 2017

Resum

En els últims anys la generació distribuïda en forma de generadors renovables s'ha anat incorporant en el sistema elèctric de forma important. Conseqüentment han sorgit nous reptes a solucionar on els sistemes d'emmagatzematge són fonamentals per donar solució a aquests. En el present treball s'identifica la problemàtica de la generació distribuïda i els mètodes que s'estan utilitzant per gestionar els recursos distribuïts en una xarxa de distribució de baixa tensió.

Seguidament es desenvolupa un model matemàtic per gestionar els recursos distribuïts de forma òptima. El model té en compte les previsions futures de generació i en conseqüència estableix els nivells de producció dels distints generadors així com també dels sistemes d'emmagatzematge amb la finalitat d'assegurar una qualitat energètica.

Per tal de verificar les millores que aporta el model matemàtic desenvolupat, aquest és aplicat mitjançant un *software* de codi obert (*Julia*) a una xarxa de distribució que funciona a 400 V, on n'és present la generació distribuïda mitjançant mòduls fotovoltaics, aerogeneradors, un generador dièsel i un sistema d'emmagatzematge. Aquesta xarxa és analitzada per distints casos de penetració de renovables i en cada una d'elles s'aplica el mètode desenvolupat així com també altres mètodes més senzills de gestió.

En vista dels resultats obtinguts, es conclou que el mètode presentat ajuda a millorar el funcionament de la xarxa on la generació distribuïda n'és present.

Resumen

En los últimos años la generación distribuida en forma de generadores renovables se ha ido incorporando en el sistema eléctrico de manera importante. Consecuentemente han surgido nuevos retos a solucionar donde los sistemas de almacenamiento son fundamentales para dar solución a éstos. En el presente trabajo se identifica la problemática de la generación distribuida y los métodos que se están utilizando para gestionar los recursos distribuidos en una red de distribución de baja tensión.

Seguidamente se desarrolla un modelo matemático para gestionar los recursos distribuidos de manera óptima. El modelo tiene en cuenta las previsiones futuras de generación y en consecuencia establece los niveles de producción de los distintos generadores así como también de los sistemas de almacenamiento con la finalidad de asegurar una calidad energética.

Con el objetivo de verificar las mejoras que aporta el modelo matemático desarrollado, éste es aplicado mediante un software de código abierto (*Julia*) a una red de distribución que funciona a 400 V, donde está presente la generación distribuida mediante módulos fotovoltaicos, aerogeneradores, un generador diésel y un sistema de almacenamiento. Esta red es analizada por distintos casos de penetración de renovables y en cada uno de ellos es aplicado el método desarrollado así como también otros métodos que presentan una gestión más sencilla.

En vista de los resultados obtenidos, se concluye que el método presentado ayuda a mejorar el funcionamiento de la red donde la generación distribuida está presente.

Abstract

In recent years renewable distributed generation has been incorporated in the electrical system significantly. Consequently new challenges have emerged where storage systems are essential to solve them. This paper identifies the problems of distributed generation and methods that are being used to manage distributed resources in a low voltage distribution network.

A mathematical model is developed to manage distributed resources optimally. In order to ensure a good energy, the model takes into account forecasts of future generation and consequently sets generation and storage systems levels.

In order to verify the improvements provided by the mathematical model developed, it is applied to a distribution network operating at 400 V. The electrical network has distributed generation using photovoltaic modules, wind turbines, a diesel generator and a storage system. The mathematical model is applied with an open source software (*Julia*) and the network is analysed for different cases of renewable penetration. In each case the developed method is applied and other simpler management methods too.

In view of the results, it is concluded that the proposed method helps to improve the network functioning where distributed generation is installed.



Agraïments

Al Francesc, el meu tutor, per haver-me donat l'oportunitat de realitzar aquest treball sota la seva supervisió i pel gran interès que ha posat dedicant temps en aconsellar-me i ajudar-me.

Als companys de classe, per convertir Elèctrica en un camí còmode i divertit i, especialment, als amics que he fet al llarg d'aquests anys.

A la gent que es preocupa per mi, i particularment a la meva germana, als meus pares, a la meva padrina i al meu padrí jove.





Glossari

Aquí es presenten alguns dels símbols i abreviacions utilitzats al llarg del treball. Les taules amb els símbols utilitzats en l'escriptura del model matemàtic desenvolupat es troben en els apartats corresponents.

Bin	Nombre binari $\{0, 1\}$
\mathbb{N}	Nombre natural
P	Potència activa
Q	Potència reactiva
\mathbb{R}	Nombre real
\mathbb{R}^+	Nombre real positiu



Índex de taules

Taula 1. Principals diferències entre una xarxa tradicional i una xarxa intel·ligent.	14
Taula 2. Índex del model agregat predictiu amb les seves característiques.	24
Taula 3. Paràmetres del model agregat predictiu.	25
Taula 4. Variables del model agregat predictiu.	26
Taula 5. Índex del model desagregat instantani.	29
Taula 6. Paràmetres del model desagregat instantani.	30
Taula 7. Variables del model desagregat instantani.	31
Taula 8. Característiques del busos de la xarxa d'estudi.	37
Taula 9. P_{PV} i P_{vent} instal·lada i percentatge de penetració segons el tipus d'habitatge.	42
Taula 10. P_{gNR} per un alt nivell de penetració de renovables.	54
Taula 11. Pèrdues amb un alt nivell de penetració de renovables.	55
Taula 12. Tensió màxima, mínima i mitjana amb un alt nivell de penetració de renovables.	57
Taula 13. P_{gNR} per un nivell mitjà de penetració de renovables.	59
Taula 14. Pèrdues amb un nivell mitjà de penetració de renovables.	60
Taula 15. Tensió màxima, mínima i mitjana amb un nivell mitjà de penetració de renovables.	62
Taula 16. P_{gNR} per un nivell baix de penetració de renovables.	63
Taula 17. Pèrdues amb un nivell baix de penetració de renovables.	65
Taula 18. Tensió màxima, mínima i mitjana amb un baix nivell de penetració de renovables.	67
Taula 19. Resum dels resultats més significatius dels casos analitzats.	69
Taula 20. $V_{m\grave{a}x}$ [pu] – $V_{m\grave{i}n}$ [pu].	70
Taula 21. Emissions de CO2 corresponents a les principals activitats desenvolupades.	73
Taula 22. Pressupost del cost material.	77
Taula 23. Pressupost del cost d'enginyeria.	77
Taula 24. Pressupost del cost total.	77



Índex de figures

Figura 1. Esquema conceptual de la metodologia aplicada al treball.	4
Figura 2. Esquema il·lustratiu d'un SEP.	5
Figura 3. Esquema de disseny majoritari de les xarxes de distribució.	7
Figura 4. Esquema de flux de potència unidireccional i bidireccional.	10
Figura 5. Esquema representatiu de canvis en la parametrització de les proteccions elèctriques provocat per la generació distribuïda.	11
Figura 6. Esquema de perfil de tensió amb generació distribuïda i sense.	11
Figura 7. Esquema representatiu del desequilibri entre generació i consum.	12
Figura 8. Esquema representatiu de perfil de tensió i flux bidireccional en generació distribuïda de renovables.	13
Figura 9. Elements presents a una xarxa intel·ligent.	13
Figura 10. Tipus de gestió de càrregues.	17
Figura 11. Esquema conceptual d'una gestió d'energia centralitzada (CEMS).	18
Figura 12. Esquema conceptual d'una gestió d'energia descentralitzada (DEMS).	19
Figura 13. Passos a seguir en l'elaboració d'un model.	20
Figura 14. Representació dels elements que poden estar connectats a cada bus.	21
Figura 15. Esquema conceptual del model aplicat.	22
Figura 16. Esquema del model agregat predictiu.	24
Figura 17. Esquema del rendiment aplicat en el sistema d'emmagatzematge.	27
Figura 18. Esquema conceptual de la metodologia seguida en el cas d'estudi.	35
Figura 19. Esquema general del model desenvolupat aplicat al cas d'estudi.	37
Figura 20. Esquema de l'arquitectura de la xarxa d'estudi.	38
Figura 21. Escenari de preu considerat.	38
Figura 22. Esquema de distribució dels perfils elegits per cada habitatge.	40
Figura 23. Gràfica de la demanda total de potència activa a la xarxa d'estudi.	41
Figura 24. Gràfica de la demanda total de potència reactiva a la xarxa d'estudi.	41
Figura 25. Perfil de radiació considerat en els casos estudiats.	43
Figura 26. Perfil de vent considerat en els casos estudiats.	43
Figura 27. Generació renovable instal·lada pel cas 1 de penetració de renovables considerat.	44
Figura 28. Generació renovable instal·lada pel cas 2 de penetració de renovables considerat.	45
Figura 29. Generació renovables instal·lada pel cas 3 de penetració de renovables considerat.	45
Figura 30. Esquema de la metodologia seguida per presentar els resultats.	46
Figura 31. Diagrama conceptual del funcionament del primer mètode.	46
Figura 32. Diagrama conceptual del funcionament del segon mètode.	47
Figura 33. Esquema representatiu de la interacció entre els distints arxius.	49
Figura 34. Diagrama de blocs de l'estructura del model agregat predictiu.	50

Figura 35. Diagrama de blocs de l'estructura del model desagregat instantani.	50
Figura 36. Llegendes de colors de la procedència de la potència activa generada.	51
Figura 37. Llegendes de colors de la destinació de la potència activa generada.	51
Figura 38. Col·locació del mètode a la gràfica en cada una de les gràfiques representades.	52
Figura 39. Generació amb un alt nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.	53
Figura 40. Despesa amb un alt nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.	55
Figura 41. SOC amb un alt nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.	56
Figura 42. Busos que presenten el pitjor perfil de tensió amb un alt nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.	57
Figura 43. Generació amb un nivell mitjà de penetració aplicant cada un dels mètodes.	58
Figura 44. Despesa amb un nivell mitjà de penetració aplicant cada un dels mètodes.	59
Figura 45. SOC amb un nivell mitjà de penetració aplicant cada un dels mètodes.	60
Figura 46. Busos que presenten el pitjor perfil de tensió amb un nivell mitjà de penetració aplicant cada un dels mètodes.	61
Figura 47. Generació amb un baix nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.	62
Figura 48. Despesa amb un nivell baix de penetració aplicant cada un dels mètodes.	64
Figura 49. SOC amb un nivell baix de penetració aplicant cada un dels mètodes.	65
Figura 50. Busos que presenten el pitjor perfil de tensió amb un nivell baix de penetració aplicant cada un dels mètodes.	66
Figura 51. Representació de les tensions màximes i mínimes per cada cas de penetració de renovables utilitzant cada un dels mètodes.	69
Figura 52. Pèrdues per un alt nivell de penetració de renovables aplicant cada mètode.	87
Figura 53. Pèrdues per un nivell mitjà de penetració de renovables aplicant cada mètode.	88
Figura 54. Pèrdues per un baix nivell de penetració de renovables aplicant cada mètode.	89
Figura 55. Fragment de la taula d'elecció del tipus d'habitatge assignat a cada bus de la xarxa.	91
Figura 56. Pestanyes per l'elecció de l'escenari de radiació i vent desitjats.	91
Figura 57. Pestanya desplegable per l'elecció de penetració de renovables.	91

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VII
ÍNDEX DE TAULES	IX
ÍNDEX DE FIGURES	XI
1. PREFACI	1
1.1. Origen del treball	1
1.2. Motivació.....	1
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1. Objectius	3
2.2. Abast.....	3
2.3. Metodologia aplicada	4
3. ESTAT DEL CONEIXEMENT	5
3.1. Sistema elèctric de potència	5
3.1.1. Xarxa de distribució	6
3.1.2. Generació distribuïda	8
3.1.3. Problemàtica a la xarxa de distribució	9
3.2. Xarxa intel·ligent	13
3.2.1. Microxarxes	14
3.2.2. EMS com a solució a la problemàtica.....	15
3.3. Model	19
4. SOLUCIÓ PLANTEJADA	21
4.1. Introducció	21
4.2. Model matemàtic plantejat	22
4.3. Model agregat predictiu	23
4.3.1. SETs	24
4.3.2. Objectiu	24

4.3.3.	Paràmetres	25
4.3.4.	Variables	26
4.3.5.	Restriccions	26
4.4.	Model desagregat instantani.....	28
4.4.1.	SETs	29
4.4.2.	Objectiu	29
4.4.3.	Paràmetres	30
4.4.4.	Variables.....	31
4.4.5.	Restriccions	31
5.	CAS D'ESTUDI	35
5.1.	Introducció	35
5.2.	Consideracions aplicades.....	36
5.3.	Xarxa a estudiar	37
5.3.1.	Perfils de demanda i generació	39
5.3.2.	Sistema d'emmagatzematge	43
5.4.	Presentació dels distints casos analitzats.....	44
5.5.	Criteris de qualitat energètica	48
5.6.	Aplicació del model matemàtic desenvolupat.....	48
5.6.1.	Diagrama de blocs de l'escriptura del model en <i>Julia</i>	50
6.	RESULTATS OBTINGUTS I ANÀLISI	51
6.1.	Nivell alt de penetració de renovables.....	53
6.1.1.	Generació	53
6.1.2.	Despesa	55
6.1.3.	Estat de càrrega de la bateria	56
6.1.4.	Tensió	57
6.2.	Nivell mitjà de penetració de renovables	58
6.2.1.	Generació	58
6.2.2.	Despesa	59
6.2.3.	Estat de càrrega de la bateria	60
6.2.4.	Tensió	61
6.3.	Nivell baix de penetració de renovables	62
6.3.1.	Generació	62
6.3.2.	Despesa	64
6.3.3.	Estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge	65
6.3.4.	Tensió	66

7. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS	69
8. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	73
8.1. Emissions derivades del treball realitzat	73
8.2. Contribució del treball en la reducció d'impacte ambiental derivat de la xarxa elèctrica	73
CONCLUSIONS	75
PRESSUPOST	77
Cost material	77
Cost d'enginyeria	77
Cost total	77
BIBLIOGRAFIA	79
ANNEX A	83
A1. Sistema per unitat (pu)	83
A2. Matriu d'admitància de bus	84
ANNEX B	85
B1. Elecció de la potència nominal de les plaques fotovoltaïques	85
ANNEX C	87
C1. Pèrdues per un nivell alt de penetració de renovables	87
C2. Pèrdues per un nivell mitjà de penetració de renovables	88
C3. Pèrdues per un nivell baix de penetració de renovables	89
ANNEX D	91
D1. Funcionament bàsic dels Excels utilitzats	91
ANNEX E	93
E1. Fitxer <i>Matlab</i> per la preparació de dades per a aplicar el model agregat predictiu al cas d'estudi	93
E2. Fitxer <i>Matlab</i> per la preparació de dades per a aplicar el model desagregat instantani al cas d'estudi	96
E3. Model agregat predictiu pel cas d'estudi aplicat amb <i>Julia</i>	99
E4. Model desagregat instantani pel cas d'estudi aplicat amb <i>Julia</i>	101
E5. Fitxer <i>Matlab</i> per a la representació dels resultats	103



1. Prefaci

Aquest capítol pretén donar a conèixer l'origen del treball desenvolupat així com també la motivació que se'n deriva.

1.1. Origen del treball

La producció energètica en el sistema elèctric tradicional es basa principalment en grans centrals productores d'energia utilitzant combustibles fòssils. Aquest fet ha permès gestionar la producció amb l'objectiu de satisfer la demanda amb les seves corresponents fluctuacions en cada instant de temps.

Aquest treball pretén ser una continuació del Treball Final de Grau *“Análisis técnico de una red de distribución con penetración de energías renovables y baterías”* (1) presentat en la convocatòria de gener del 2017. En el treball esmentat es realitza un estudi de la problemàtica de penetració de generadors distribuïts renovables i es planteja la implementació d'un sistema de bateries com a mètode per millorar-ne els inconvenients que se'n deriven. No obstant, no s'aplica una gestió del sistema d'emmagatzematge i com el seu propi autor indica aquesta en pot ser una millora futura.

Aquest darrer punt és d'on sorgeix el present treball, *“Gestió de recursos distribuïts a la xarxa de baixa tensió”*.

1.2. Motivació

La transició cap a un model energètic on les energies renovables en siguin la principal font de producció d'energia va lligat a modificacions en la manera d'entendre i gestionar el sistema elèctric que s'ha dut a terme fins ara. Un dels motius és que l'energia produïda per part de tecnologies que utilitzen fonts energètiques renovables depenen de factors externs no controlables, les condicions climàtiques.

En els últims anys la generació distribuïda ha agafat presència en el sistema elèctric, sobretot de mòduls fotovoltaics i aerogeneradors, provocant el sorgiment de noves problemàtiques solucionades mitjançant els sistemes d'emmagatzematge d'energia. No obstant, encara n'és un tema en expansió la forma òptima de gestionar el conjunt del sistema i és en aquesta direcció on està enfocat el present treball.



2. Introducció

Aquest apartat pretén ser una introducció del treball “Gestió de recursos distribuïts a la xarxa de baixa tensió” amb la intenció de donar a conèixer al lector el contingut del document. El capítol es divideix en distints apartats amb la finalitat d’explicar els objectius, l’abast i la metodologia que s’ha aplicat.

2.1. Objectius

L’objectiu del treball, com el seu títol ja indica, és la gestió dels recursos distribuïts a la xarxa de baixa tensió en corrent altern mitjançant el desenvolupament d’un model matemàtic.

Així, per una banda, cal conèixer el funcionament d’una xarxa amb recursos distribuïts per tal d’identificar la problemàtica que presenta així com també les solucions que se’n deriven. Per l’altra, cal modelar matemàticament una xarxa elèctrica de distribució en baixa tensió, adquirir els coneixements de funcionament i limitacions que presenta el programari de codi obert utilitzat així com també les directrius bàsiques en la realització d’un model matemàtic.

2.2. Abast

Les hipòtesis considerades en el plantejament de la solució són:

- Funcionament en règim sinusoïdal permanent de la xarxa. La connexió i desconexió dels distints elements presents a la xarxa no provoquen inestabilitat en el sistema.
- Es considera només una fase. Conseqüentment els generadors i càrregues es troben connectades totes a la fase considerada.
- El sistema d’emmagatzematge es veu com una caixa negra capaç de carregar-se i descarregar-se amb un rendiment aplicat tants cops com sigui necessari. Es desprecia així el funcionament intern.
- La generació distribuïda pot estar instal·lada en forma d’aerogeneradors, plaques fotovoltaïques o generadors no renovables.
- El correcte dimensionat de les plaques fotovoltaïques, aerogeneradors i sistema d’emmagatzematge no és l’objectiu d’aquest treball ja que allò utilitzat són tan sols perfils de generació.
- No es té en compte la despesa energètica derivada del funcionament dels convertidors.
- Es consideren que les càrregues no són gestionables.
- No s’estudia la implementació física del model matemàtic desenvolupat a una xarxa.

- Cal tenir present que el model s'ha desenvolupat per utilitzar el sistema per unitat. Per a més informació sobre el sistema per unitat es pot consultar l'Annex A.

2.3. Metodologia aplicada

Per realitzar aquest projecte es duen a terme un conjunt de passos. Entre ells, el primer que es fa és un recull de la informació més important a tenir en compte pel treball desenvolupat. En aquest sentit s'identifica la problemàtica de la generació distribuïda així com també les formes de gestió que se'n deriven. Tot seguit, es desenvolupa un model matemàtic de gestió dels recursos distribuïts i s'elegeix una xarxa de distribució en baixa tensió amb càrregues connectades i generadors distribuïts connectats amb l'objectiu d'aplicar el model a la xarxa seleccionada. Per tal de poder extreure conclusions, el model és comparat amb tres altres formes de gestió de la xarxa. Finalment es comparen els distints mètodes per extreure les conclusions pertinents.

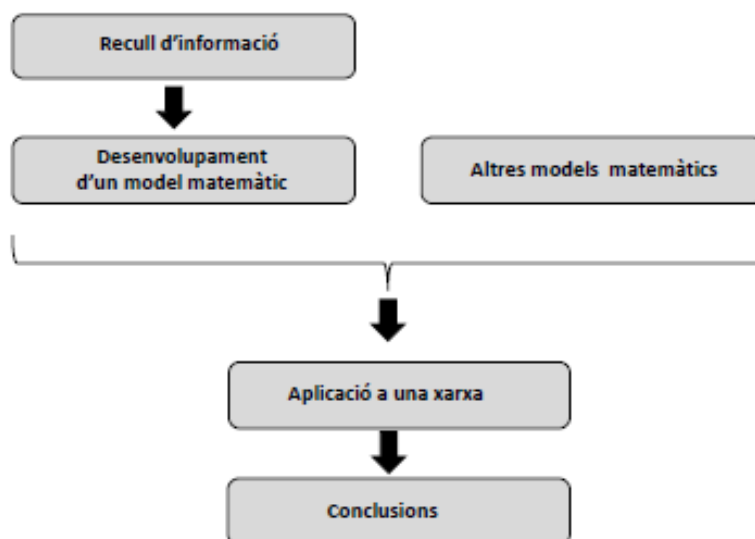


Figura 1. Esquema conceptual de la metodologia aplicada al treball.

3. Estat del coneixement

La producció energètica en el sistema elèctric tradicional es basa principalment en grans centrals productores d'energia provinent de combustibles fòssils. No obstant, la integració de generació distribuïda comporta nous canvis. En aquesta direcció, el capítol és un recull de la informació més important a tenir en compte pel present treball.

3.1. Sistema elèctric de potència

Un sistema elèctric de potència (SEP) és el conjunt d'instal·lacions i aparells dedicats a generar, transportar i distribuir l'energia elèctrica. En un SEP tradicional es diferencien bàsicament el procés de generació, transport i distribució (2).

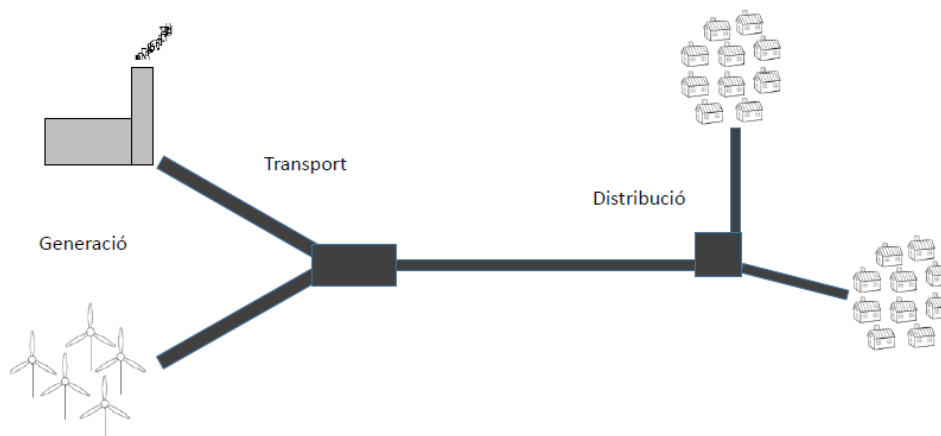


Figura 2. Esquema il·lustratiu d'un SEP.

Tradicionalment les grans centrals generadores són les encarregades de generar l'electricitat que posteriorment serà consumida. La producció d'electricitat es realitza gràcies a la transformació d'una font d'energia primària, sovint d'origen no renovable com són els combustibles fòssils o nuclears.

Majoritàriament l'energia elèctrica es genera i transmet en forma de corrent altern mitjançant línies elèctriques a alta tensió (igual o superior a 220 kV). El transport a tensions altes permet minimitzar les pèrdues derivades de la xarxa de transport. En aquest camí, els últims anys ha agafat força, gràcies als avenços tecnològics, el transport a grans distàncies en corrent continu a alta tensió (HVDC, de l'anglès *high-voltage direct current*). Un dels avantatges principals que presenta el transport utilitzant aquesta tecnologia és la disminució de les pèrdues (3).

A les subestacions es duu a terme les modificacions necessàries pel transport i distribució de l'electricitat. Entre les modificacions es pot trobar la variació de tensió, la manipulació de la freqüència i del nombre de fases o la compensació de potència reactiva entre d'altres (1).

Amb la finalitat que l'energia transportada pugui ser distribuïda és necessari reduir la seva tensió amb transformadors reductors per adaptar-la als nivells de consum. En aquesta direcció, la xarxa de distribució és l'encarregada de ramificar la xarxa de transport amb l'objectiu de portar l'energia als punts de consum amb les característiques pertinents. Es calcula que entre un 7% i 8% de l'energia produïda es malbaratada en pèrdues en les xarxes de transmissió i distribució (3). La xarxa de distribució es troba explicada en més detall a l'apartat "Xarxa de distribució".

És important que la xarxa elèctrica es mantengui dins uns paràmetres establerts per al correcte funcionament de tots els elements connectats a ella. Entre els paràmetres més importants es troba la freqüència de la xarxa determinada per la velocitat de gir dels generadors. Aquesta no és igual a tots els països del món; si bé la gran majoria, i Espanya entre ells, presenten una freqüència de 50 Hz, alguns països com Canadà, Estats Units, Brasil o Japó utilitzen la xarxa elèctrica amb una freqüència de 60 Hz. Un dels altres paràmetres és la regulació de la tensió a causa de les caigudes de tensió al llarg del transport (4).

3.1.1. Xarxa de distribució

La xarxa de distribució, part del SEP on ocorre l'estudi d'aquest projecte, és la ramificació de les línies de transport a distints punts de consum presentant un voltatge de nivell inferior amb la finalitat que els usuaris puguin consumir l'energia elèctrica. És a dir, és el conjunt de conductors amb els seus corresponents accessoris que interconnecten una font d'energia amb les instal·lacions interiors o receptores (5). La responsabilitat de les xarxes de distribució roman en les companyies distribuïdores de l'electricitat als consumidors (2).

Les línies de la xarxa de distribució es poden classificar en dos grups segons els seus nivells de tensió. Per una banda, hi ha les línies de mitja tensió que són freqüents en línies que finalitzen a centres de transformació i el rang de tensió es troba d'1 kV a 36 kV. Per altra banda, hi ha les línies de baixa tensió, encarregades de distribuir electricitat per al consum directe a tensions menors d'1 kV, normalment 400 V o 220 V (5).

Les xarxes de baixa tensió, on es centra aquest treball, presenten distintes classificacions. Una d'elles és en funció de la zona transitada: urbana o rural. La principal diferència és que a les zones urbanes el consum per unitat de superfície és superior. Per aquesta raó és necessari que els conductors de les zones urbanes presentin una secció major (6).

Una altra classificació de les xarxes de baixa tensió és segons la forma com s'ha distribuït la xarxa; és a dir, si transita per sota terra o aèriament. Les aèries es troben instal·lades per sobre del terra i es classifiquen segons la zona on són utilitzades. Així hi pot haver xarxes trenades posades (utilitzat preferentment a les zones urbanes, on el cablejat va instal·lat directament sobre les façanes) o xarxes trenades tibades (utilitzat en zones rurals o en una zona d'habitatges dispersos, on el cablejat s'instal·la amb suports metàl·lics, de formigó o fusta mitjançant elements d'amarratge). Les xarxes aèries de baixa tensió es van substituint cada cop amb major freqüència per les xarxes subterrànies. No obstant, encara són presents a moltes poblacions, sobretot rurals. La raó principal del seu muntatge és l'econòmic (6).

La gran majoria de xarxes de distribució són dissenyades de forma radial i ramificada, tot i que alguns cops, per necessitat de la companyia elèctrica, es troben en forma d'anell (7).

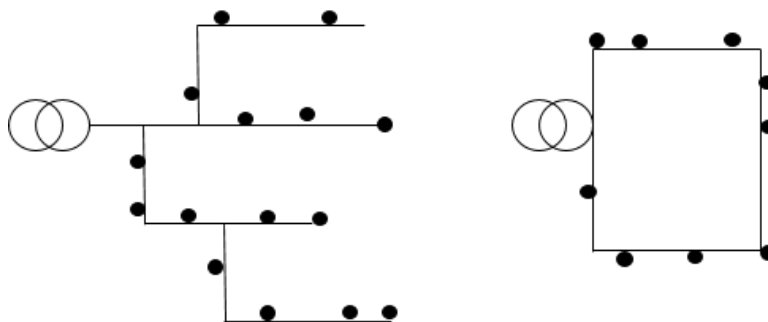


Figura 3. Esquema de disseny majoritari de les xarxes de distribució: radial i ramificada (imatge de l'esquerra) i en anell (imatge de la dreta).

El sistema radial és aquell que presenta un únic camí, per on passa el corrent sense retorn. Surt d'una subestació i es va ramificant la seva distribució. Aquest tipus és el més simple i econòmic ja que els aparells utilitzats són menors. No obstant presenta desavantatges com és la baixa fiabilitat provocada per la jerarquització de la distribució.

La distribució en anell compta amb més d'una trajectòria entre la font de generació i la càrrega per satisfer la demanda elèctrica. Aquest sistema surt d'una subestació, passa per tots els punts on ha de subministrar energia i torna al punt de partida.

Un altre tipus de sistema molt més fiable que els dos anteriors, tot i que no es troba gaire estès, és el sistema de distribució en xarxa on s'alimenta el sistema des de dues fonts.

3.1.2. Generació distribuïda

La generació distribuïda és la generació elèctrica connectada directament a la xarxa de distribució o a la instal·lació interna del client (8).

Molt sovint s'associa el concepte generació distribuïda a la utilització d'energies renovables. Si bé molta de la generació produïda és a partir de recursos energètics renovables no té perquè sempre ser així (8). Quan aquest tipus d'energia pren o no part en la generació distribuïda és convenient explicitar-ho per evitar confusió. D'acord amb l'*Agència internacional de l'Energia*, els recursos renovables són aquells que generalment no estan sotmesos a esgotament (calor, llum del sol, força del vent o biomassa entre altres fonts).

En la generació distribuïda les tecnologies es poden classificar en tres grups segons l'origen de la font energètica (9):

- **Energies renovables**
Les més instal·lades són la generació fotovoltaica i l'eòlica. No obstant, també n'és present la solar tèrmica o biomassa entre d'altres.
- **Combustibles fòssils**
La majoria de generadors que utilitzen els combustibles fòssils són generadors dièsel o microturbines de gas. Sovint, els primers són capaços de subministrar el total de la demanda de forma independent tot i que el seu funcionament va lligat a un cost elevat. Referent a les microturbines de gas, aquestes semblen tenir un increment de penetració gràcies a la seva eficiència que pot arribar al 65%.
- **Altres fonts**
Per poder gaudir plenament dels beneficis de les fonts d'energia renovables és necessari disposar de sistemes d'emmagatzematge. Entre ells hi ha la utilització del fenomen de la electròlisi; és a dir, quan hi ha un excedent d'electricitat es produeix hidrògen i viceversa en cas de dèficit elèctric. També s'utilitza l'emmagatzematge d'excedent d'energia en forma d'aigua calenta aïllada en tancs per posteriorment utilitzar el seu poder calorífic. La utilització de bateries és el sistema més utilitzat actualment gràcies a les seves reduïdes dimensions que permeten utilitzar-lo en infinitats d'aplicacions. Un dels altres sistemes utilitzats són els volants d'inèrcia, capaços d'absorbir potències instantànies elevades (10).

Amb freqüència es tendeix a descriure la generació distribuïda com a un tipus de generació més respectuosa pel medi ambient que no pas una generació centralitzada. Les emissions de gasos provinents de les tecnologies típiques en la generació distribuïda (fotovoltaica i eòlica principalment) són més baixes que les corresponents a les centrals elèctriques de carbó. No obstant, grans centrals productores hidroelèctriques també presenten emissions molt menors que les centrals de carbó. A

més, la generació distribuïda comporta una disminució en les pèrdues de la línia de transmissió gràcies a la ubicació adequada de la font de generació i a trobar-se el generador més a prop del punt de consum (8). Tot i això, cal tenir present que una ubicació inadequada de la generació distribuïda pot incrementar les pèrdues del sistema (10).

Al ser distints generadors repartits, la fallada d'un d'ells no comporta un greu problema pel sistema elèctric i conseqüentment en millora la fiabilitat, la seguretat i la qualitat energètica del sistema (11) (12). Alhora permet la diversificació energètica, l'autosuficiència d'una regió, la millora del rendiment en la producció així com també la disminució de xarxes de transport i centres de transformació, disminuint l'impacte visual, les inversions i donant lloc a una millor acceptació social (13).

La generació elèctrica mitjançant cogeneració comporta que gran part de l'energia primària és consumida per la producció de calor. En la generació distribuïda, al trobar-se els generadors més a prop del punt de consum permet que aquesta calor sigui aprofitada en habitatges o indústries a diferència del que passa en grans centrals allunyades de la zona urbana, on la calor no té utilitat (14).

No obstant, alguns experts argumenten que una gran penetració de generació distribuïda podria comportar que les grans centrals generadors treballassin per sota dels seu límit d'eficiència òptima i aquest fet comportaria un augment de les emissions de gasos per l'energia produïda (8).

Una de les aplicacions més comunes de la generació distribuïda és la de subministrar energia a les càrregues crítiques (15). També és utilitzada per satisfer la demanda d'un zona durant períodes de temps d'alta demanda energètica, on per exemple l'actualització o instal·lació de noves línies de distribució no estan disponibles o són molt costoses (12). Tenint en compte que si el consum per unitat de superfície es veu augmentat és necessari una secció major del conductor, la generació distribuïda podria ser utilitzada per evitar aquest augment (6).

La generació distribuïda pot ser incorporada al sistema elèctric més ràpidament que solucions convencionals, les quals necessiten llargs períodes de temps per a la construcció de noves centrals generadores. A més, permet ser incorporada a la xarxa de forma progressiva ajustant-se així al creixement del consum (10).

3.1.3. Problemàtica a la xarxa de distribució

A causa de la quantitat de punts de sumistre elèctric (28 milion) i la gran extensió (més de 2 milions de km) la xarxa de distribució no es troba monitoritzada. A més, al ser tan extensa el control en temps real de la xarxa és molt complicat. Generalment es troba automatitzat el control i operació dels nivells més alts de tensió corresponents a la xarxa de distribució. No obstant, els nivells de baixa tensió no presenten cap tipus d'automatització, control ni mesura (16).

La presència de la generació distribuïda presenta certa problemàtica associada. Principalment afecta a les eines de planificació tradicional utilitzades per les companyies elèctriques, les quals necessiten ser modificades per ser adaptades a la nova situació. En aquest sentit, el mètode que s'havia dut a terme tradicionalment per tractar la necessitat d'ampliació de la xarxa i la predicció de generació necessita ser revisat perquè es troben unitats generadores dispersades al llarg de la xarxa (10).

La generació distribuïda pot provocar l'aparició de fluxos de potència bidireccionals. Generalment la xarxa no està preparada per aquesta utilització ja que està dissenyada de forma radial i pensada per l'operació tradicional (15). És a dir, el flux de potència és de nivells d'alta tensió cap a nivells de baixa tensió donant lloc a una estructura jerarquitzada. No obstant, la introducció de generació distribuïda pot propiciar que això no sigui així i que la xarxa de distribució passi de comportar-se de sistema consumidor a sistema generador propiciant el flux de potència cap a la xarxa d'alta tensió (10).

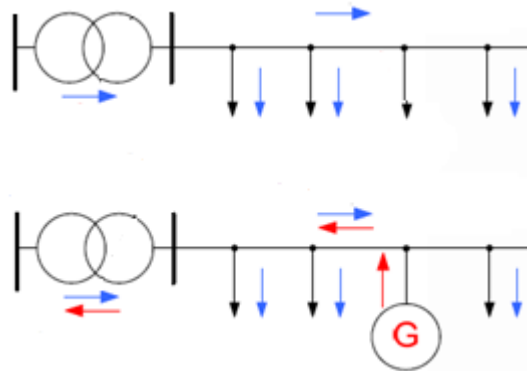


Figura 4. Esquema de flux de potència unidireccional (superior) i flux de potència bidireccional (inferior).

Font: elaborat a partir de (17).

Sovint la introducció de generació distribuïda provoca la necessitat de modificacions de la xarxa per tal d'evitar problemes en els sistemes de protecció de la xarxa elèctrica causat per la pèrdua de la coordinació de les proteccions, les quals majoritàriament foren dissenyades per a una configuració radial i fluxes unidireccionals. En aquest sentit, la introducció de nous generadors pot incrementar la possibilitat de fallada a la xarxa a punts propers de la connexió però segons el tipus de generador utilitzat, la probabilitat de fallada es veu reduïda. Així doncs, la utilització de generadors en corrent continu connectats a la xarxa mitjançant convertidors electrònics presenten un nivell de fallada molt baix (10).

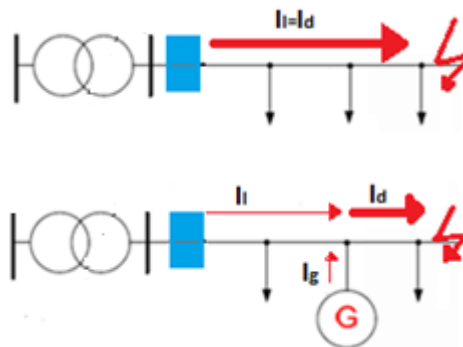


Figura 5. Esquema representatiu de canvis en la parametrització de les proteccions elèctriques provocats per la generació distribuïda.

Font: elaborat a partir de (17).

A la Figura 5 es pot observar que si es produeix un defecte a la línia i no hi ha generació distribuïda connectada la intensitat de defecte (I_d) coincideix amb la intensitat que transcorre per la protecció (I_i). No obstant, si hi ha presència de generació distribuïda, la intensitat que transcorre per la protecció és menor que la intensitat de defecte.

La regulació de la tensió en el sistema elèctric tradicional es realitza normalment a les subestacions, basant-se en fluxos de potència radials de la subestació cap als punt de consum d'energia. En introduir la generació distribuïda i aquesta localitzar-se aigües avall d'un regulador de tensió, comporta que el control realitzat per regular la tensió sigui incapaç de mesurar adequadament l'energia i consegüentment la regulació que se'n faci sigui nefasta (18). Paradoxalment aquest és un fet que es contraposa a la millora que pot proporcionar la generació distribuïda en la regulació de la tensió. És a dir, la caiguda de tensió experimentada al llarg de la xarxa de distribució sense presència de generació distribuïda podria ser corregida amb la presència de generació distribuïda ja que com més proper es troba un bus d'un generador major és la tensió en ell, tal i com es pot veure a la Figura 6 (12).

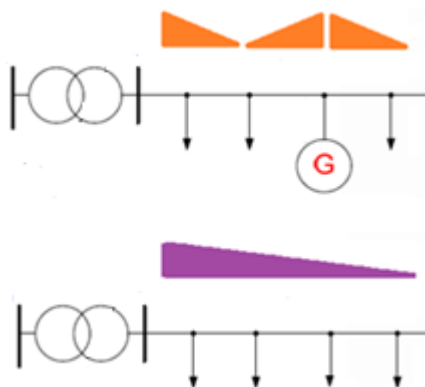


Figura 6. Esquema de perfil de tensió amb generació distribuïda (taronja) i sense generació distribuïda (lila).

Font: elaborat a partir de (17).

Impacte de la generació renovable

La penetració de renovables a la xarxa de distribució, molts cops no va lligat a cap tipus de control. Quan els generadors d'origen renovable (majoritàriament de font solar i eòlic) són instal·lats a la xarxa, tenen com a finalitat satisfer la demanda dels respectius habitatges on són instal·lats. Cada cop hi ha més particulars que opten per la instal·lació de fonts d'energia renovable amb l'objectiu de reduir el cost de l'energia consumida (19). En aquests casos, normalment si hi ha un excedent d'energia (energia produïda però que no és consumida) és injectada a la xarxa. En cas contrari, si hi ha un dèficit d'energia (l'energia produïda és insuficient per satisfer la demanda) aquesta s'extreu de la xarxa. Com més penetració de renovables hi ha, més excedent d'energia és injectada a la xarxa per part dels generadors distribuïts.

La probabilitat que la generació sigui superior a la demanda i viceversa es pot veure incrementada en la utilització de fonts d'energia renovable. Quan l'excedent d'energia és injectat a la xarxa sense cap tipus de control, la generació és superior a la demanda i conseqüentment pot propiciar un augment de la freqüència i agreujar també la problemàtica de fluxos bidireccionals (20).

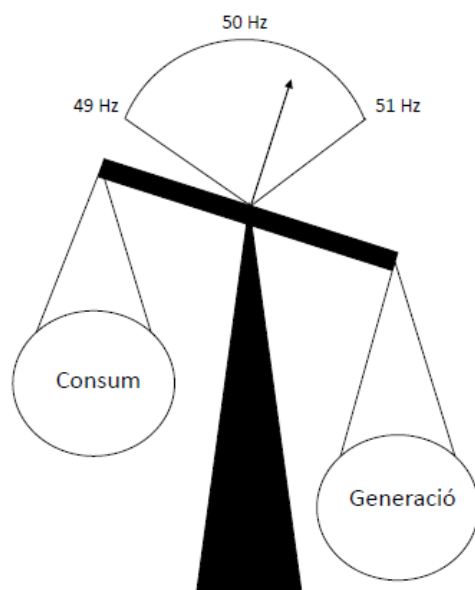


Figura 7. Esquema representatiu del desequilibri entre generació i consum.

A mesura que s'incrementa la penetració de renovables amb generació distribuïda el problema dels fluxos de potència bidireccionals es veu incrementat podent originar sobrecàrregues i sobretensions a les branques més pròximes al transformador i a aquest mateix. Aquest pot provocar perturbacions en el subministre de l'energia als clients (21).

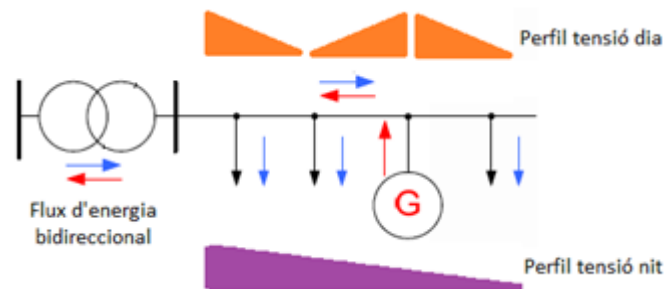


Figura 8. Esquema representatiu de perfil de tensió i flux bidireccional en generació distribuïda de renovables.
Font: elaborat a partir de (17).

A la Figura 8 es pot veure que si els generadors connectats com a generació distribuïda són d'origen renovable (mòduls fotovoltaics principalment), el perfil de tensió varia al llarg del dia a causa de la temporalitat de generació provocada per les condicions climàtiques. També els fluxos d'energia bidireccionals tan sols apareixen quan el generador està connectat.

3.2. Xarxa intel·ligent

En els últims anys ha sorgit un nou concepte de xarxa. La xarxa elèctrica de distribució s'ha combinat amb tecnologies d'informació modernes donant lloc al que es coneix com a xarxa intel·ligent (22). Aquesta és capaç d'integrar de manera eficient el comportament i accions de tots els usuaris connectats amb l'objectiu de proporcionar sistemes elèctrics econòmicament eficients, sostenibles, amb poques pèrdues i un alt nivell de qualitat, seguretat i garantia de subministre, d'acord amb la definició que en fa el grup de treball de la Unió Europea.

La xarxa intel·ligent es preveu que sigui la xarxa del futur on hi seran presents una sèrie d'elements (17) que es poden veure en el forma de diagrama a la Figura 9.

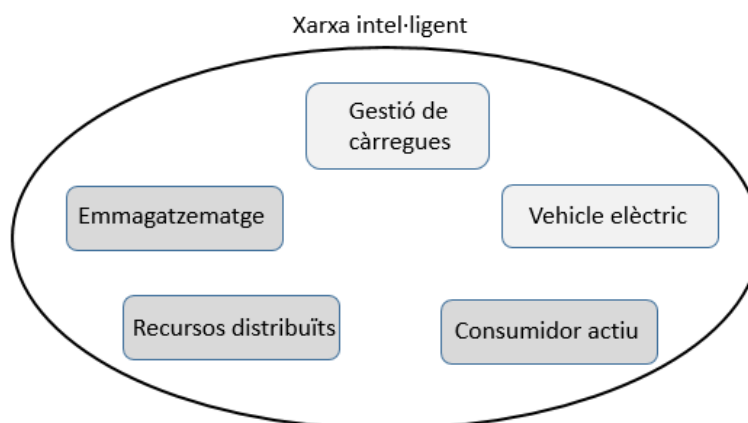


Figura 9. Elements presents a una xarxa intel·ligent.

El terme xarxa intel·ligent porta associat un bon grapat de conceptes. Entre ells es troba la flexibilitat d'adaptació a les necessitats canviants del sistema, la comunicació bidireccional, la disponibilitat de la informació en temps real, la capacitat de satisfer les necessitats energètiques minimitzant la necessitat de noves infraestructures, la integració de forma segura de les energies renovables, el respecte amb el medi ambient, la utilització d'equips digitals, l'estructura en xarxa, la utilització de gran quantitat de sensors, la monitorització automàtica, un control exhaustiu i distribuït i l'augment de poder de decisió de l'usuari, entre d'altres conceptes (17) (23).

La comparació d'algunes característiques (17) que comporta una xarxa intel·ligent a diferència d'una xarxa tradicional es pot veure en la següent taula.

Taula 1. Principals diferències entre una xarxa tradicional i una xarxa intel·ligent.

Xarxa tradicional	Xarxa intel·ligent
Equips electromecànics	Equips digitals
Comunicació unidireccional	Comunicació bidireccional
Generació centralitzada	Generació distribuïda
Estructura jerarquizada	Estructura en xarxa
Pocs sensors	Sensors per tota la xarxa
Sense monitorització	Monitorització automàtica
Coneixement general de l'entorn	Correlació temporal amb l'entorn
Control limitat i centralitzat	Control exhaustiu i distribuït
Poques opcions per l'usuari	Augment del poder de decisió de l'usuari

3.2.1. Microxarxes

Alguns experts auguren que el futur està en la concepció de la xarxa elèctrica en xarxes més petites a on en sigui present l'emmagatzemament de l'energia per poder compensar les fluctuacions presents en el consum i en la generació per part de les energies renovables. A més, el funcionament en microxarxa conjuntat amb sistemes d'emmagatzematge permetria comprar l'energia en els períodes de menor preu per autoabastir les càrregues en aquells instants on l'energia és més cara. No obstant, aquest fet comporta nous reptes des del punt de vista del control (24).

Es pot considerar una microxarxa com un conjunt de càrregues, generadors i emmagatzematge que pot ser gestionat de forma aïllada o connectada a la resta de la xarxa elèctrica de manera coordinada per subministrar electricitat de forma fiable (24). La xarxa principal percep a aquesta com un conjunt de càrregues i generadors que formen un únic sistema i conseqüentment pot permetre la integració massiva de la generació distribuïda. Les microxarxes es poden considerar com l'estructura primordial de les Xarxes Elèctriques Intel·ligents (25) (26). El sistema de generació principal de les microxarxes és

la generació distribuïda ja que sense aquest tipus de generació no és possible comprendre el concepte de microxarxa.

Entre els avantatges que presenten les microxarxes es troba la disminució de la dependència energètica de la xarxa elèctrica general, fet que proporciona la capacitat d'operar de forma aïllada. No obstant, la connexió i desconnexió de la microxarxa de la xarxa principal s'ha de realitzar de forma correcta per evitar que el sistema elèctric es vegi afectat ja que quan està treballant en mode de connexió a xarxa, la freqüència i la tensió venen fixades per la xarxa principal. El funcionament de forma aïllada es pot donar de forma intencionada o a causa de pertorbacions a la xarxa (24).

3.2.2. EMS com a solució a la problemàtica

Les problemàtiques plantejades al llarg dels apartats anteriors porta cap al concepte de sistema de gestió d'energia com a solució (EMS, de l'anglès *Energy Management System*). La gestió energètica pretén optimitzar l'ús de recursos energètics i la utilització de fonts d'energia renovables, realitzar un anàlisi econòmic i desenvolupar noves tècniques de producció i estalvi d'energia. És a dir, consisteix en optimitzar l'ús d'energia cercant un ús racional i eficient sense perdre prestacions. Amb els sistemes de gestió d'energia es podria supervisar, controlar i optimitzar el rendiment del sistema de generació així com la distribució aconseguint alts nivells d'eficiència energètica (27).

L'elevat ús d'energies renovables i de generació distribuïda provoca que l'ús intel·ligent d'emmagatzematge d'energia mitjançant bateries recarregables i altres dispositius d'emmagatzematge jugui un paper molt important en aquest tipus de sistemes. A més, no tots els sistemes de gestió són iguals ja que depèn dels recursos gestionables, l'algoritme aplicat o l'arquitectura del sistema.

3.2.2.1. Els sistemes d'emmagatzematge

Els sistemes d'emmagatzematge d'energia apareixen com a solució al problema de falta de control de generació en les energies renovables. Aquesta solució es basa en l'emmagatzematge d'energia no consumida per evitar sobrecàrregues i millorar les condicions d'operació de la xarxa elèctrica.

El fet d'introduir sistemes d'emmagatzematge, a part de millorar les condicions d'operació de la xarxa, permetrà a les energies renovables una millor actuació en el mercat elèctric deixant corregir les desviacions davant la planificació realitzada. Així es podrà planificar la venda d'energia basant-se en els períodes on el preu és major (24).

Aquest treball està centrat en xarxes de distribució en baixa tensió. No obstant, a Espanya, per agrupacions de generació de més de 5 MW de potència Red Eléctrica (operador del sistema elèctric) disposa de l'únic centre de control del món (Cecre) per controlar que la integració de les energies

renovables en el sistema elèctric sigui segura. El centre de control rep, cada 12 segons i en temps real, la informació dels generadors renovables. Les dades són analitzades i si s'observa possibilitat d'afectació de la seguretat del sistema s'estableixen ordres de limitació de la producció d'energia renovable no gestionable (28). En resum, el funcionament es basa en retallar la producció provinent de fonts renovables però el fet de disposar de sistemes d'emmagatzematge podria comportar una millor actuació en el mercat elèctric per part d'aquests centres de generació.

3.2.2.2. Vehicles elèctrics

La instal·lació de sistemes d'emmagatzematge d'energia comporta un cost d'instal·lació. No obstant, la previsió d'un increment del parc automobilístic elèctric, un dels temes d'interès és l'ús de les bateries dels vehicles (29).

Si bé actualment la gran majoria de punts de càrrega sols permeten actuar al vehicle com a càrrega, s'està avançant en els sistemes de càrrega intel·ligent per permetre actuar les bateries com a petits generadors (16). D'aquesta manera, en els moments que no es fa ús del vehicle, podria ser utilitzada com a sistema d'emmagatzematge d'energia per una xarxa elèctrica. Aquest punt podria ser un aliat en la gestió de l'emmagatzematge de l'energia ja que un bon ús dels vehicles elèctrics reduiria la necessitat de noves inversions a la xarxa de distribució (16).

3.2.2.3. Generació controlable

La majoria dels casos de penetració d'energies renovables a la xarxa de distribució la generació no és controlable. No obstant, es tendeix a anar cap a una generació controlable. És a dir, a partir del màxim de potència que es pot generar d'acord amb les condicions climàtiques d'aquell moment, es pot gestionar quina serà la producció. D'aquesta forma, juntament amb la instal·lació de sistemes d'emmagatzematge es pretén trobar com millorar el mètode per satisfer la demanda energètica. Si bé, el fet de poder interferir en el control de la generació comporta la necessitat d'implementació d'un bon sistema de control i comunicacions.

Un cop instal·lats els generadors d'origen renovable (solar i eòlic), l'interès és que funcionin al seu màxim rendiment perquè els costos d'operació i manteniment són els mateixos (d'acord amb el Pla d'Energies Renovables 2011-2020, PER) tant si s'està produint el 100% o el 20% de la capacitat de producció (30).

3.2.2.4. Gestió de càrregues

La interacció de forma activa dels consumidors amb la xarxa, ja sigui desconnectant o disminuint el consum de les càrregues, és un camp obert. D'aquesta forma, per optimitzar la gestió energètica es

poden manipular els generadors, els sistemes d'emmagatzematge i les càrregues. El fet de manipular el consum de les càrregues, permet ajustar la corba de consum a la corba de generació.

Un exemple de càrregues desplaçables poden ser l'ús de calefacció i refrigeració. Aquestes poden funcionar amb certa flexibilitat amb el temps sense que comporti molèsties per l'usuari. És destacable que les càrregues desplaçables tenen un impacte similar a la instal·lació de sistemes d'emmagatzematge (9).

Un enfocament directe de la gestió de càrregues consisteix en un acord entre els usuaris i l'empresa que permeti controlar a distància el consum d'energia i les operacions de certs sistemes de l'habitatge; com per exemple: bombes, calefacció, ventilació o grau d'il·luminació. Si bé aquest mètode de control del consum residencial pot semblar òptim, presenta una certa problemàtica al poder-se veure vulnerada la privacitat dels usuaris (31).

La implementació de models on el preu de l'electricitat sigui en temps real i no basat en tarifes planes pot proporcionar als consumidors l'oportunitat de reduir la despesa derivada de la factura elèctrica. Amb aquest mètode es pretén estimular als usuaris a desplaçar les càrregues fora de les hores punta i aconseguir realitzar una gestió de càrregues indirectament. No obstant, estudis recents han demostrat que la manca de coneixements sobre com els usuaris responen a preus variables amb el temps i la falta de sistemes d'automatització en els habitatges, són una barrera per poder gaudir dels beneficis potencials d'aquest tipus de model (32).

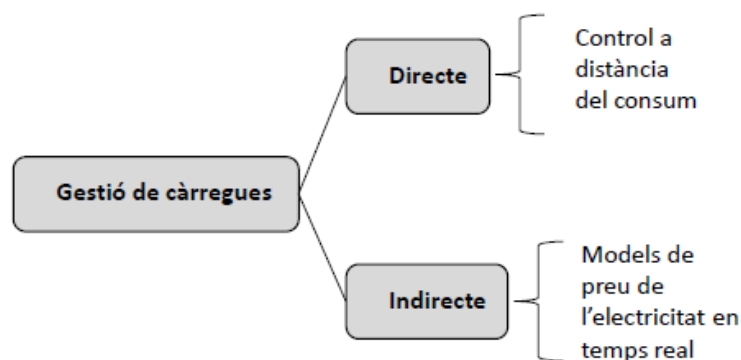


Figura 10. Tipus de gestió de càrregues.

3.2.2.5. Optimització predictiva

Els algoritmes aplicats en els sistemes de gestió d'energia poden ser varis. Des d'un punt de vista més econòmic, el fet de disposar de sistema d'emmagatzematge obri les portes a desenvolupar algoritmes d'optimització on es tingui en compte l'operació en temps real així com també la planificació diària, ja que la majoria dels models o algoritmes de control que es troben de la gestió d'energies renovables i bateries estan basats tan sols en l'optimització en temps real (24).

Els models de control predictiu tenen la capacitat de realitzar una optimització d'una funció de costos acotada en un interval de predicció considerat. Basant-se amb un model que prediu el comportament, es preten establir una seqüència de control òptima (33).

3.2.2.6. Arquitectura centralitzada i descentralitzada

Pel que fa a l'arquitectura dels sistemes de gestió d'energia es poden classificar en sistemes de gestió d'energia centralitzats o descentralitzats (9).

Sistema de gestió d'energia centralitzat

Un sistema de gestió d'energia centralitzat (CEMS, de l'anglès *Centralized Energy Management System*) es basa en un control central proveït de la informació suficient per tal de determinar directament quin ha de ser el comportament de cada un dels elements de la xarxa (9).

Aquest tipus de sistema és una arquitectura de control que encara està en procés de maduració (33). Si bé aquest tipus de gestió necessita d'una gran xarxa de telecomunicacions per poder intercanviar dades i ordres en temps real, el control i operació de la xarxa és més eficient perquè es té una visió global del comportament de tot el conjunt. Així, cada generador, sistema d'emmagatzematge o càrrega no actua de forma òptima individual sinó òptima pel conjunt considerat.

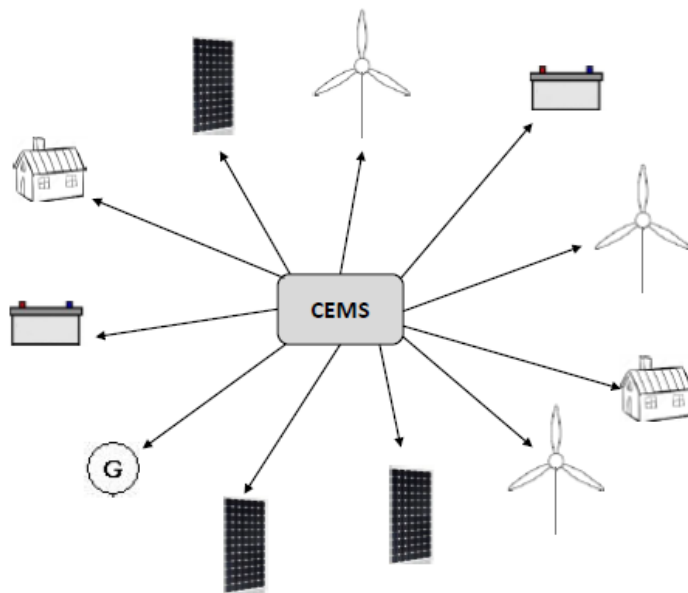


Figura 11. Esquema conceptual d'una gestió d'energia centralitzada (CEMS).

Sistema de gestió d'energia descentralitzat

Realitzar una optimització centralitzada del conjunt de tota la xarxa elèctrica seria laboriós a causa de la gran quantitat d'informació que es tindria. No obstant, si es divideix per sectors és més senzilla la seva aplicació.

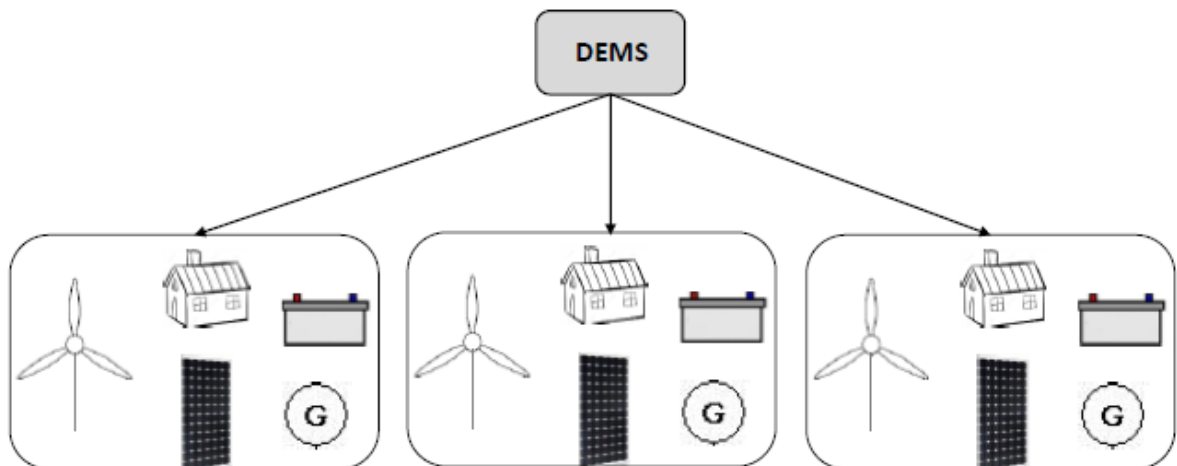


Figura 12. Esquema conceptual d'una gestió d'energia descentralitzada (DEMS).

Un sistema de gestió d'energia descentralitzat (DEMS, de l'anglès *Distributed Energy Management System*) està basat en determinar el funcionament de distintes microxarxes interconnectades entre elles. En aquest cas intervenen agents de mercat, els quals envien a la central operadora l'oferta i demanda d'energia d'acord amb les característiques de la seva microxarxa. El comportament global que haurà d'experimentar cada una de les microxarxes vindrà determinat per la central operadora. En aquest cas, és necessari un sistema de control separat per establir el funcionament dins cada microxarxa (9).

3.3. Model

El terme 'model' fa referència a una estructura que ha estat desenvolupada amb l'objectiu d'exhibir característiques. Es defineix com a una simplificació de la realitat que intenta detectar els elements fonamentals d'un problema concret, eliminant així aspectes secundaris (34).

Alguns cops aquests models són concrets; per exemple, un model d'avió utilitzat per als experiments de túnel de vent. No obstant, la majoria de vegades els models són abstractes (model matemàtic) i en ells s'utilitza el simbolisme algebraic per indicar les relacions internes d'allò que es pretén modelar. En aquest camí, els models matemàtics pretenen ser una representació d'una realitat complexa.

El model que es presenta en aquest treball es correspon a un model matemàtic.

En tots els models basats en notació matemàtica s'identifiquen cinc apartats bàsics (35) (36):

- Els SETs representen índexs de variables. Per exemple, si es té DIP1, DIP2, ..., DIP22 (representant les variables de 22 dipòsits distints) on només en varia l'ús que es fa; es pot definir DIP 'nom de l'arrel' seguit de l'índex $i=\{1,...,22\}$. D'aquesta manera el model es simplifica i les modificacions necessàries en el model, si s'ampliés o reduís el nombre de dipòsits, serien minses.
- Els paràmetres són coeficients del model provinents d'arxius externs. És a dir, són uns valors constants dins del model.
- Les variables representen les decisions que es poden prendre per influenciar en el valor de la funció objectiu.
- La funció objectiu és la funció que es desitja minimitzar o maximitzar modificant el valor de les variables i complint les restriccions establertes.
- Finalment, les restriccions són les condicions que les variables han de complir.

Quan s'optimitza un model es pretén trobar la situació òptima no millorable, més eficient (minimització o maximització de la funció objectiu), a la qual s'arriba entre opcions alternatives.

Referent a la confecció d'un model es segueixen uns passos (36) que es presenten tot seguit en forma de diagrama:

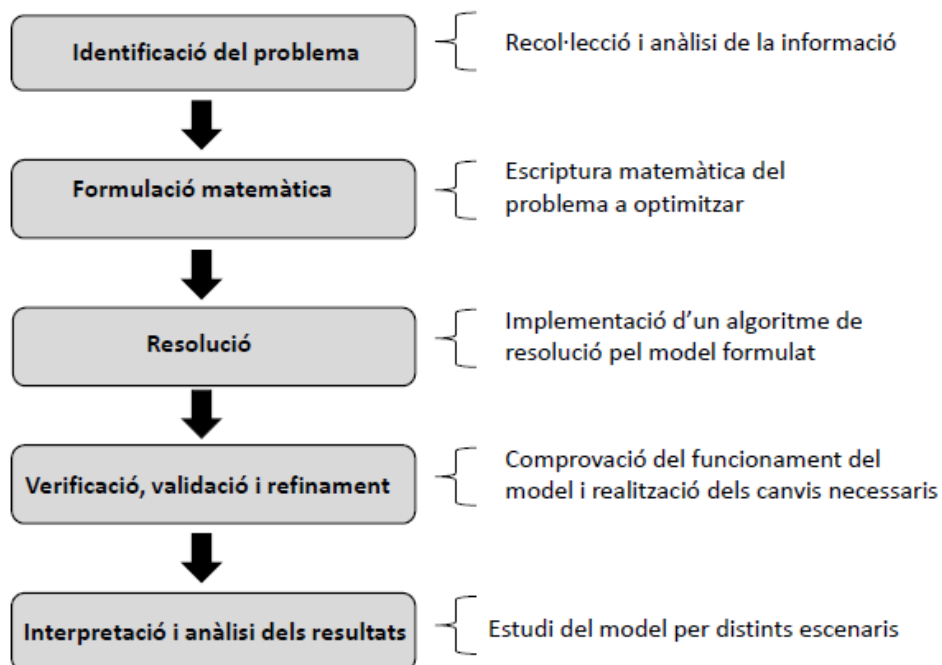


Figura 13. Passos a seguir en l'elaboració d'un model.

4. Solució plantejada

En aquest capítol es presenta una solució per gestionar els recursos distribuïts. Consta d'una introducció on s'explica en que consisteix el model matemàtic presentat així com també distints apartats on es planteja i justifica el model matemàtic realitzat.

4.1. Introducció

L'objectiu de la solució plantejada és determinar l'operació dels recursos distribuïts, a una xarxa de baixa tensió, optimitzant la seva operació. És a dir, determinar la potència que ha de subministrar cada unitat generadora per atendre una determinada demanda de potència.

El model que es presenta determina directament el comportament de cada un dels components de la xarxa a partir d'una seqüència de control òptima realitzada en funció de les previsions. Aquest contempla la possibilitat de control de la generació de potència activa i reactiva dels generadors distribuïts presents a la xarxa i també hi són presents els sistemes d'emmagatzematge.

En tots els busos de la xarxa d'estudi hi pot haver càrregues connectades. A més, poden disposar de generació mitjançant mòduls fotovoltaics, aerogeneradors i un generador no renovable. També poden estar o no connectats a la xarxa principal i disposar de sistemes d'emmagatzematge.

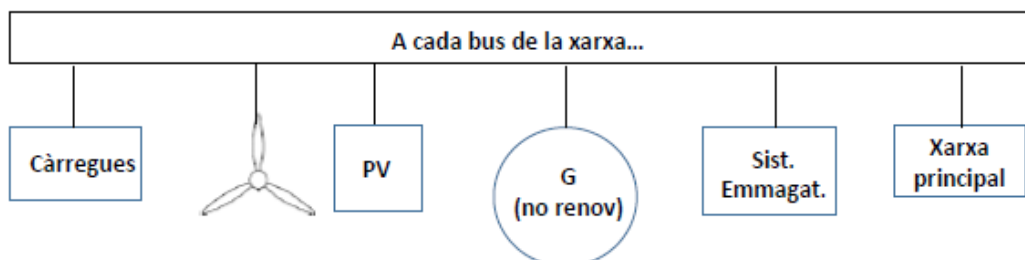


Figura 14. Representació dels elements que poden estar connectats a cada bus.

Les característiques del sistema d'emmagatzematge connectat a cada bus poden ser modificades al llarg del temps. És a dir, no té perquè ser el mateix sistema d'emmagatzematge el que estigui connectat a cada moment. Aquesta consideració té com a intenció que es pugui tenir en compte la connexió de vehicles elèctrics.

Mentre que la potència reactiva proporcionada pels aerogeneradors és proporcional a la potència activa produïda, els mòduls fotovoltaics i els sistemes d'emmagatzematge es troben connectats a la xarxa a través de convertidors capaços de proporcionar de forma controlada potència activa i reactiva.

Cal esmentar que el model plantejat està pensat per ser resolt amb la utilització del sistema per unitat. Aquest sistema es troba breument explicat a l'Annex A.

4.2. Model matemàtic plantejat

La majoria del autors consideren de forma separada el flux de potència positiu i negatiu en lloc de considerar l'intercanvi de potència net a cada un dels nodes. Si bé això suposa una simplificació en l'algoritme d'optimització, i per tant una reducció del cost d'execució del programa desenvolupat per trobar la solució, aquest fet pot portar a errors indesitjats en la solució del flux de potència. Un cas senzill de veure seria la càrrega i descàrrega d'una bateria. Si es considera que la mateixa quantitat d'energia carregada a la bateria és la descarregada, el flux de potència net és nul. No obstant, una incorrecta formulació provocaria una existència de pèrdues que en realitat no hi són (37).

En un primer moment es va desenvolupar un únic model matemàtic on es feia l'optimització del conjunt de tot un període de temps (1 dia per exemple) tenint en compte la morfologia i característiques de la xarxa. No obstant, es va haver de canviar el plantejament perquè la gran quantitat d'equacions que es tenia propiciava la impossibilitat de solucionar-ho amb el programa informàtic a causa de l'elevat cost computacional. Així, es va optar per l'elaboració de dos models on un complementa l'altre. Si es desitges, els dos models podrien ser aplicats per separat.

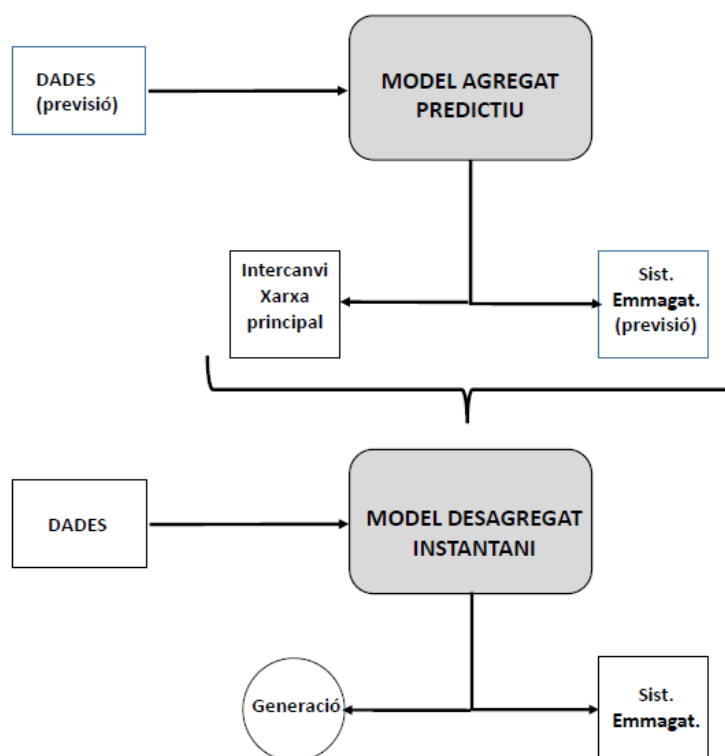


Figura 15. Esquema conceptual del model aplicat.

Per satisfer la demanda s'ha obtingut per la combinació dels dos models amb la finalitat de donar la solució òptima de generació a partir del control de les distintes fonts de generació disponible.

Primerament, s'estableix per cada instant de temps quina serà l'energia que s'injectarà a la xarxa d'estudi provinent de la xarxa principal i aquells instants que el sistema d'emmagatzematge es podrà carregar o descarregar en el cas que es trobi instal·lat algun sistema d'emmagatzematge. Això es fa a partir de la previsió de demanda energètica, sense tenir en compte les pèrdues, i la previsió de generació màxima d'acord amb les condicions climàtiques previstes.

En segon lloc, s'estableix quin és el sistema de generació més òptim per tal de satisfer la demanda i proporcionar qualitat a l'energia consumida. Es duu a terme a partir de les dades obtingudes anteriorment, la demanda d'energia (activa i reactiva) i la capacitat de generació màxima d'acord amb les condicions climàtiques en aquell instant de temps. Les dades de demanda i generació màxima es poden haver vist modificades respecte la previsió inicial. En el cas que no sigui suficient la producció de renovables, la xarxa pot disposar de generadors distribuïts d'origen no renovable com pot ser un generador dièsel entre d'altres. La generació dels generadors distribuïts d'origen no renovable són a causa de la desviació entre les previsions realitzades en el primer model (model agregat predictiu) i la gestió realitzada en el segon model (model desagregat instantani).

Es pot considerar que el model agregat predictiu realitza una previsió i el model desagregat instantani planteja el control dels distints elements (generadors i sistemes d'emmagatzematge) per tal de complir les condicions establertes per cada instant de temps considerat. És a dir, el primer model es trobaria a un nivell superior on es realitzaria el pronòstic de gestió de forma òptima del període considerat a partir de les dades que es disposen. El segon es trobaria a un nivell inferior on ja es regularia els recursos de la xarxa amb la finalitat de complir l'objectiu establert.

4.3. Model agregat predictiu

En aquest model es redueix la xarxa d'estudi a un únic bus. És a dir, en un únic bus hi ha la generació total de potència activa de la xarxa d'estudi i la demanda total de potència activa. Aquest bus es troba connectat amb la xarxa elèctrica principal i quan a la xarxa d'estudi la generació no és suficient per satisfer la demanda, la potència faltant s'extreu de la xarxa principal. És a dir, s'estableix l'energia que es comprarà provinent de la xarxa principal.

Cal recordar, que en aquest plantejament no es tenen en compte les pèrdues de transmissió de la xarxa estudiada ni la potència reactiva.

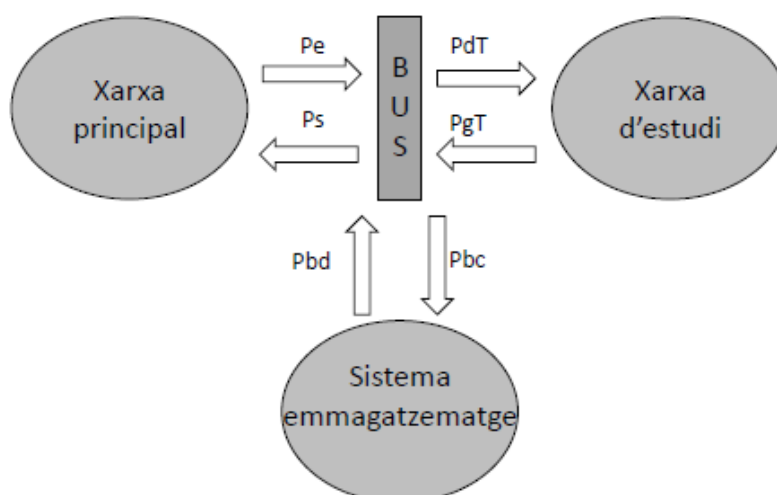


Figura 16. Esquema del model agregat predictiu.

Un problema de programació del tipus lineal entera mixta (MILP) és el que s'ha plantejat. Aquest tipus de programació es caracteritza perquè alguna variable representa decisions del tipus tot o res (1 o 0), model binari.

4.3.1. SETs

L'índex utilitzat en el model es presenta en aquest apartat en forma de taula juntament amb les característiques que el componen.

Taula 2. Índex del model agregat predictiu amb les seves característiques.

SET	Índex	Tipus	Descripció
t	$\{1, \dots, temps\}$	\mathbb{N}	Fa referència a l'instant temporal i és utilitzat pels paràmetres que varien al llarg del temps i les variables que poden ser modificades en els distints instants de temps

4.3.2. Objectiu

L'objectiu d'aquest model és minimitzar la dependència energètica, és a dir, la compra d'energia procedent de la xarxa principal. No obstant, en el cas d'haver-la de comprar, es vol minimitzar el cost de compra i conseqüentment es té en compte si surt rentable comprar-ne per emmagatzemar-la.

També es maximitza la càrrega del sistema d'emmagatzematge amb la finalitat que si hi ha generació renovable que no es preveu consumir, aquesta sigui igualment generada i emmagatzemada. La descàrrega del sistema es minimitza amb la finalitat de no utilitzar l'energia emmagatzemada si hi ha

capacitat de generació per part dels generadors renovables. D'igual manera, també es maximitza els instants que el sistema d'emmagatzematge es carrega ($a[t]$).

$$\text{MIN} \sum_{t=1}^{\text{temps}} (Pe[t] \cdot Preu[t] + Ps[t] - Pbc[t] + Pbd[t] \cdot 2 - a[t]/10) \cdot Dt \quad (\text{Eq. 1})$$

4.3.3. Paràmetres

Els paràmetres del model es presenten en forma de taula indicant el tipus i la descripció de cada un d'ells.

Taula 3. Paràmetres del model agregat predictiu.

Paràmetres	Tipus	Descripció
Nn	\mathbb{N}	Nombre de nusos de la xarxa
$temps$	\mathbb{N}	Períodes considerats
Dt	\mathbb{R}^+	Increment de temps entre períodes
$PdT[t]$	\mathbb{R}^+	Previsió de la potència activa demandada per tot el conjunt
$PgmaxT[t]$	\mathbb{R}^+	Previsió de la potència activa generada màxima
$Preu[t]$	\mathbb{R}^+	Preu de l'energia en €/MWh
$EBATi[t]$	\mathbb{R}^+	Estat energètic a l'instant anterior del sistema d'emmagatzematge connectat en aquell moment
$EBATmin[t]$	\mathbb{R}^+	Estat energètic mínim del conjunt dels distints sistemes d'emmagatzematge
$EBATmax[t]$	\mathbb{R}^+	Estat energètic màxim del conjunt dels distints sistemes d'emmagatzematge
$RBATc[t]$	\mathbb{R}^+	Rendiment de càrrega del conjunt dels distints sistemes d'emmagatzematge
$RBATd[t]$	\mathbb{R}^+	Rendiment de descàrrega del conjunt dels distints sistemes d'emmagatzematge

L'estat energètic màxim i mínim del conjunt dels distints sistemes d'emmagatzematge s'obté a partir de la suma d'ells:

$$EBATmax[t] = \sum_{i=1}^{Nn} EBATmax_i[t] \quad (\text{Eq. 2})$$

$$EBATmin[t] = \sum_{i=1}^{Nn} EBATmin_i[t] \quad (\text{Eq. 3})$$

El rendiment de càrrega i descàrrega del conjunt dels distints sistemes d'emmagatzematge s'obté a partir de la suma ponderada:

$$RBATc[t] = \sum_{i=1}^{Nn} \frac{EBATmax_i[t]}{EBATmax[t]} \cdot RBATc_i[t] \quad (\text{Eq. 4})$$

$$RBATd[t] = \sum_{i=1}^{Nn} \frac{EBATmax_i[t]}{EBATmax[t]} \cdot RBATd_i[t] \quad (\text{Eq. 5})$$

4.3.4. Variables

Les variables del model es presenten en forma de taula indicant el tipus i la descripció de cada una d'elles.

Taula 4. Variables del model agregat predictiu.

Variables	Tipus	Descripció
$Pe[t]$	\mathbb{R}^+	Potència procedent de la xarxa principal
$Ps[t]$	\mathbb{R}^+	Potència injectada a la xarxa principal
$PgT[t]$	\mathbb{R}^+	Potència activa generada per la xarxa d'estudi
$Pbc[t]$	\mathbb{R}^+	Potència carregada al sistema d'emmagatzematge
$Pbd[t]$	\mathbb{R}^+	Potència descarregada del sistema d'emmagatzematge
$a[t]$	Bin	Càrrega (1) o descàrrega (0) del sistema d'emmagatzematge
$b[t]$	Bin	Potència entrant (1) o sortint (0) de la xarxa principal
$EBAT[t]$	\mathbb{R}^+	Energia disponible al conjunt del sistema d'emmagatzematge

4.3.5. Restriccions

El balanç de potències al bus ha de ser nul. És a dir, les potències actives consumides equivaldran a les potències actives generades:

$$PgT[t] + Pbd[t] + Pe[t] = PdT[t] + Pbc[t] + Ps[t] \quad (\text{Eq. 6})$$

La potència que generarà la xarxa d'estudi serà menor a la màxima que pugui generar a partir de generadors renovables d'acord amb la previsió de les condicions climàtiques:

$$PgT[t] \leq PgmaxT[t] \quad (\text{Eq. 7})$$

L'estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge es correspondrà a l'estat de càrrega a l'instant anterior del considerat del sistema que es troba connectat en aquell moment més l'energia injectada al sistema tenint en compte el rendiment:

$$EBAT[t] = EBATi[t] + (Pbc[t] \cdot RBATc[t] - Pbd[t]/RBATd[t]) \cdot Dt \quad (\text{Eq. 8})$$

El rendiment de càrrega del sistema d'emmagatzematge ($RBATc[t]$) representa la relació entre l'energia emmagatzemada i l'energia subministrada per carregar el sistema. Aplicant el mateix raonament, el rendiment de descàrrega del sistema d'emmagatzematge ($RBATd[t]$) representa la relació entre l'energia descarregada i l'energia subministrada pel sistema d'emmagatzematge (38).

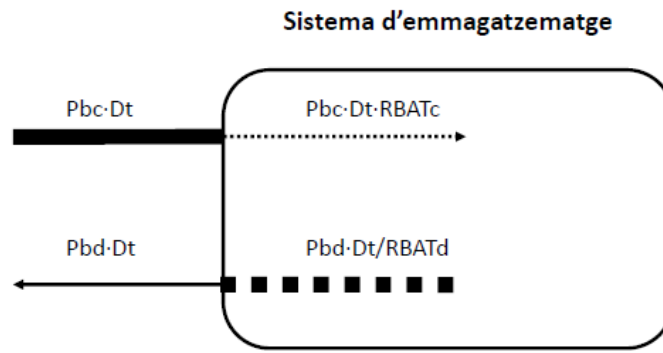


Figura 17. Esquema del rendiment aplicat en el sistema d'emmagatzematge.

L'estat de càrrega es trobarà entre un mínim i un màxim:

$$EBATmin[t] \leq EBAT[t] \leq EBATmax[t] \quad (\text{Eq. 9})$$

L'estat energètic a l'instant anterior del sistema d'emmagatzematge connectat en aquell moment, $EBATi[t]$, podrà presentar dues situacions. La primera, en el cas que el sistema d'emmagatzematge no s'hagi canviat serà el valor obtingut a l'instant anterior.

$$EBATi[t] = EBAT[t - 1] \quad (\text{Eq. 10})$$

No obstant, en la segona, si el sistema d'emmagatzematge s'ha canviat, presentarà un nou valor que serà un paràmetre. És a dir, serà un valor que no s'obté dels càlculs realitzat fins aquell moment:

$$EBATi[t] \neq EBAT[t - 1] \quad (\text{Eq. 11})$$

En el moment que el sistema d'emmagatzematge es carregui no es podrà descarregar i viceversa. És per aquest motiu que s'ha introduït la variable binària "a":

$$0 \leq Pbc[t] \leq a[t] \cdot 4000 \quad (\text{Eq. 12})$$

$$0 \leq Pbd[t] \leq (1 - a[t]) \cdot 4000 \quad (\text{Eq. 13})$$

D'aquesta forma, al multiplicar la variable $a[t]$ per un nombre suficientment elevat (4000 per exemple), a l'instant que sigui òptim la càrrega del sistema, a $a[t]$ se li assignarà el valor de 1. Així, la variable corresponent a la potència carregada ($Pbc[t]$) es trobarà en el rang $[0,4000]$ i la variable corresponent a la potència descarregada es trobarà en el rang $[0,0]$ i conseqüentment haurà de ser nul·la. Aplicant el mateix raonament, quan sigui òptim que el sistema s'estigui descarregant la variable binària $a[t]$ valdrà 0.

L'intercanvi de potència de la xarxa d'estudi amb la principal també s'estableix a partir d'una variable binària, en aquest cas $b[t]$. Si hi ha potència injectada a la xarxa d'estudi que prové de la xarxa principal, no es podrà injectar potència a la xarxa principal provinent de la xarxa d'estudi:

$$Pe[t] \leq b[t] \cdot 4000 \quad (\text{Eq. 14})$$

$$Ps[t] \leq (1 - b[t]) \cdot 4000 \quad (\text{Eq. 15})$$

Dels resultats obtinguts amb el model agregat predictiu, s'utilitza com a dades del model desagregat instantani els valors de potència intercanviada amb la xarxa principal ($Pe[t]$) i els valors referents a si el sistema d'emmagatzematge es pot carregar o descarregar ($a[t]$).

4.4. Model desagregat instantani

En aquest model es troba la solució òptima de generació dels distints busos de la xarxa d'estudi per a cada instant de temps considerat. Aquí ja es tenen en compte les pèrdues de transmissió de la xarxa estudiada i la potència reactiva.

En el model desagregat instantani, l'optimització es realitza per cada instant de temps considerat de forma independent. És a dir, la funció objectiu, les variables i restriccions corresponen a un instant de temps (t). El model s'aplicaria de forma cíclica a cada un dels instants de temps desitjats.

En aquest apartat del model es planteja un problema del tipus programació no lineal. Aquest es caracteritza perquè les restriccions, la funció objectiu o ambdues coses són no lineals. Els problemes d'optimització no lineal comporten un major cost de resolució que no pas els lineals.

4.4.1. SETs

L'índex utilitzat en el model es presenta en aquest apartat en forma de taula juntament amb les característiques que el componen.

Taula 5. Índex del model desagregat instantani.

SET	Índex	Tipus	Descripció
i	$\{1, \dots, Nn\}$	\mathbb{N}	Fa referència a cada bus de la xarxa i és utilitzat pels paràmetres que varien i les variables que poden variar per cada un dels busos.

4.4.2. Objectiu

L'objectiu del model és satisfer la demanda energètica per cada un dels instants considerats mantenint el mòdul de la tensió el més proper a 1 pu possible, el qual és un indicador de bona qualitat energètica.

També es minimitza la potència activa generada pels generadors no renovables i es maximitza la càrrega del sistema d'emmagatzematge amb la intenció que la potència generable d'origen renovable que no és consumida però pot ser generada es generi i sigui emmagatzemada. Al mateix temps, es minimitza la descàrrega del sistema per evitar que quan els generadors renovables tinguin capacitat de generació la demanda no sigui satisfeta amb energia provinent del sistema d'emmagatzematge. En definitiva, es planteja una funció objectiu de suma ponderada per resoldre un problema d'optimització multiobjectiu.

$$MIN \left(\frac{\sum_{i=1}^{Nn} Pbd[i]}{2} - \frac{\sum_{i=1}^{Nn} Pbc[i]}{2} + Pg_{NR} + 300 \cdot \sum_{i=1}^{Nn} vabs[i] \right) \quad (\text{Eq. 16})$$

La suma de Pbc (potència activa carregada al sistema global d'emmagatzematge) per tots els busos es divideix entre un factor de 2 per evitar que la potència generada pels generadors no renovables sigui emmagatzemada. És a dir, s'evita que els generadors no renovables produeixin energia per ser emmagatzemada.

La suma de Pbd (potència activa descarregada del sistema global d'emmagatzematge) per tots els busos es divideix entre un factor de 2 perquè en el cas que la generació de renovables no sigui suficient, l'energia provingui del sistema d'emmagatzematge abans que dels generadors no renovables.

La desviació del mòdul de la tensió als busos respecte a 1 pu ($vabs[i]$) es multiplica per un factor per proporcionar un pes dins la funció de tal manera que el resultat obtingut en la optimització sigui acceptable. El factor que s'ha elegit és de 300 ja que empíricament s'ha comprovat per distints factors i aquell que s'ha considerat més adient en vista dels resultats obtinguts ha estat el presentat.

4.4.3. Paràmetres

Els paràmetres del model es presenten en forma de taula indicant el tipus i la descripció de cada un d'ells.

Taula 6. Paràmetres del model desagregat instantani.

Paràmetres	Tipus	Descripció
Nn	\mathbb{N}	Nombre de nusos de la xarxa
$Pd[i]$	$\mathbb{R}+$	Potència activa demandada per cada bus
$Qd[i]$	\mathbb{R}	Potència reactiva demandada per cada bus
$DPgmax_{PV}[i]$	$\mathbb{R}+$	Dades de potència activa màxima generada a cada bus a cada instant de temps a partir de sistema fotovoltaic
$DPgmax_v[i]$	$\mathbb{R}+$	Dades de potència activa màxima generada a cada bus a cada instant de temps a partir d'aerogenerador
$DPgmax_{NR}[i]$	$\mathbb{R}+$	Dades de potència activa màxima generada per cada bus a cada instant de temps a partir de font no renovable
$DPgmin_{NR}[i]$	$\mathbb{R}+$	Dades de potència activa mínima generada per cada bus a cada instant de temps a partir de font no renovable
$DPg_x[i]$	$\mathbb{R}+$	Dades de potència activa provinent directament de la xarxa principal
$DPd_x[i]$	$\mathbb{R}+$	Dades de potència activa injectada directament a la xarxa principal
$a[t]$	Bin	Càrrega (1) o descàrrega (0) del sistema d'emmagatzematge
$EBATmin[i]$	$\mathbb{R}+$	Estat energètic mínim del sistema d'emmagatzematge
$EBATmax[i]$	$\mathbb{R}+$	Estat energètic màxim del sistema d'emmagatzematge
$Sn_{PV}[i]$	$\mathbb{R}+$	Potència aparent nominal màxima de generació del conjunt fotovoltaic
$Sn_{trafo}[i]$	$\mathbb{R}+$	Potència aparent nominal màxima de generació del transformador que connecta la xarxa principal amb la d'estudi
$AQg_{PV}[i]$	Bin	1 si el conjunt fotovoltaic pot proporcionar potència reactiva, 0 en cas contrari
$Sn_b[i]$	$\mathbb{R}+$	Potència aparent nominal màxima de generació del sistema d'emmagatzematge.
$AQg_b[i]$	Bin	1 si el sistema d'emmagatzematge pot proporcionar potència reactiva, n cas contrari 0
$B[i, k]$	\mathbb{R}	Part imaginària de la matriu Ybus
$G[i, k]$	\mathbb{R}	Part real de la matriu Ybus
$RBATc[i]$	$\mathbb{R}+$	Rendiment de càrrega del sistema d'emmagatzematge
$RBATd[i]$	$\mathbb{R}+$	Rendiment de descàrrega del sistema d'emmagatzematge
$\alpha[i]$	\mathbb{R}	Factor de proporcionalitat corresponent a la generació de potència reactiva per part dels aerogeneradors.

4.4.4. Variables

Les variables del model es presenten en forma de taula indicant el tipus i la descripció de cada una d'elles.

Taula 7. Variables del model desagregat instantani.

Variables	Tipus	Descripció
$V[i]$	\mathbb{R}^+	Mòdul de la tensió
$\delta[i]$	\mathbb{R}	Argument de la tensió
$P[i]$	\mathbb{R}	Potència activa de bus
$Q[i]$	\mathbb{R}	Potència reactiva de bus
$Qg_{PV}[i]$	\mathbb{R}	Potència reactiva generada pel sistema fotovoltaic
$Qg_v[i]$	\mathbb{R}	Potència reactiva generada per l'aerogenerador
$Qg_b[i]$	\mathbb{R}	Potència reactiva generada pel sistema d'emmagatzematge
$Qg_x[i]$	\mathbb{R}	Potència reactiva generada per la xarxa principal
$Pg_{PV}[i]$	\mathbb{R}^+	Potència activa generada a partir de sistema fotovoltaic
$Pg_v[i]$	\mathbb{R}^+	Potència activa generada a partir d'aerogenerador
$Pg_{NR}[i]$	\mathbb{R}^+	Potència generada de font no renovable
$APg_{NR}[i]$	Bin	1 si hi ha generació de potència de font no renovable, 0 en cas contrari
$vabs[i]$	\mathbb{R}^+	Variable per mesurar la desviació de la tensió
$Pbc[i]$	\mathbb{R}^+	Potència carregada al sistema d'emmagatzematge
$Pbd[i]$	\mathbb{R}^+	Potència descarregada al sistema d'emmagatzematge
$EBAT[i]$	\mathbb{R}^+	Estat energètic del sistema d'emmagatzematge
$EBAT_a[i]$	\mathbb{R}^+	Estat energètic del sistema d'emmagatzematge a l'instant anterior

4.4.5. Restriccions

Per tots els nusos es té l'equació real de potència activa de bus (39):

$$P[i] = V[i] \cdot \sum_{k=1}^{Nn} V[k] \cdot (G[i, k] \cdot \cos(\delta[i] - \delta[k]) + B[i, k] \cdot \sin(\delta[i] - \delta[k])) \quad (\text{Eq. 17})$$

Per tots els nusos es té l'equació real de potència reactiva de bus (39):

$$Q[i] = V[i] \cdot \sum_{k=1}^{Nn} V[k] \cdot (G[i, k] \cdot \sin(\delta[i] - \delta[k]) - B[i, k] \cdot \cos(\delta[i] - \delta[k])) \quad (\text{Eq. 18})$$

La desviació del mòdul de la tensió respecte a 1 pu es pot obtenir de la manera que es presenta tot seguit:

$$vabs[i] = (1 - V[i])^2 \quad (\text{Eq. 19})$$

Com més proper a 1 pu sigui el mòdul de la tensió, menor serà el valor de la variable $vabs[i]$.

La potència activa i reactiva injectada a cada bus correspondrà a la diferència entre la generació i el consum (39). Per tant:

$$P[i] = Pg_{PV}[i] + Pg_v[i] + Pg_{NR}[i] + DPg_x[i] + Pbd[i] - Pbc[i] - Pd[i] \quad (\text{Eq. 20})$$

$$Q[i] = Qg_x[i] + Qg_{PV}[i] + Qg_v[i] + Qg_b[i] - Qd[i] \quad (\text{Eq. 21})$$

La potència generada en cada bus pel generador renovable ha de ser menor al màxim:

$$0 \leq Pg_{PV}[i] \leq DPg_{max_{PV}}[i] \quad (\text{Eq. 22})$$

$$0 \leq Pg_v[i] \leq DPg_{max_v}[i] \quad (\text{Eq. 23})$$

La potència generada en cada bus pel generador no renovable ha de ser menor al màxim. A més, en el cas de generar s'estableix un possible valor mínim de generació. Això es fa en vista que hi ha fonts de generació que tenen un mínim en cas d'estar connectades. Per tant:

$$APg_{NR}[i] \cdot DPg_{min_{NR}}[i] \leq Pg_{NR}[i] \leq DPg_{max_{NR}}[i] \cdot APg_{NR}[i] \quad (\text{Eq. 24})$$

L'estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge, igual que en el primer model, es correspondrà a l'estat de càrrega en l'instant anterior més l'energia injectada al sistema tenint en compte el rendiment:

$$EBAT[i] = EBAT_a[i] + (Pbc[i] \cdot RBATc[i] - Pbd[i]/RBATd[i]) \cdot Dt \quad (\text{Eq. 25})$$

L'estat energètic a l'instant anterior del sistema d'emmagatzematge connectat en aquell moment, $EBAT_a[i]$, podrà presentar dues situacions. En el cas que el sistema d'emmagatzematge no s'hagi canviat serà el valor obtingut a l'instant anterior ($t-1$).

$$EBAT_a[i] = EBAT_a[i, t - 1] \quad (\text{Eq. 26})$$

No obstant si el sistema d'emmagatzematge s'ha canviat, presentarà un nou valor que serà un paràmetre. És a dir, serà un valor que no s'obté dels càlculs realitzat fins aquell moment:

$$EBAT_a[i] \neq EBAT[i, t - 1] \quad (\text{Eq. 27})$$

Permetre la modificació de les característiques del sistema d'emmagatzematge té com a finalitat la possibilitat d'utilitzar els vehicles elèctrics que puguin estar connectats a la xarxa com a sistemes d'emmagatzematge. Es podria donar el cas que en determinats instants del dia es trobessin connectats i en altres no.

L'estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge es trobarà entre un mínim i un màxim:

$$EBATmin[i] \leq EBAT[i] \leq EBATmax[i] \quad (\text{Eq. 28})$$

Tant la potència carregada com la descarregada de cada un dels sistemes d'emmagatzematge serà positiva o nul·la:

$$Pbc[i] \geq 0 \quad (\text{Eq. 29})$$

$$Pbd[i] \geq 0 \quad (\text{Eq. 30})$$

La potència que es carregarà al conjunt de tot el sistema d'emmagatzematge està condicionada pels resultats obtinguts del model agregat predictiu ($a[t]$). El valor que s'havia obtingut de si es podia carregar o descarregar el sistema d'emmagatzematge en la primera part del model, es multiplica per un factor elevat com pot ser 4000. La suma de potència carregada als diferents sistemes d'emmagatzematge serà menor al màxim:

$$\sum_{i=1}^{Nn} Pbc[i] \leq a[t] \cdot 4000 \quad (\text{Eq. 31})$$

De la mateixa forma, la potència proporcionada pel sistema d'emmagatzematge estarà condicionada per:

$$\sum_{i=1}^{Nn} Pbd[i] \leq (1 - a[t]) \cdot 4000 \quad (\text{Eq. 32})$$

La potència activa i reactiva que proporcionarà el sistema d'emmagatzematge haurà de complir que:

$$Sn_b[i]^2 \geq (Pbc[i] - Pbd[i])^2 + (Qg_b[i] \cdot AQg_b[i])^2 \quad (\text{Eq. 33})$$

La potència activa i reactiva que proporcionarà el sistema fotovoltaic serà tal que:

$$Sn_{PV}[i]^2 \geq Pg_{PV}[i]^2 + (Qg_{PV}[i] \cdot AQg_{PV}[i])^2 \quad (\text{Eq. 34})$$

Es contempla la possibilitat que els convertidors puguin o no generar potència reactiva en vista que hi ha convertidors que ho permeten.

La potència activa i reactiva provinent de la xarxa principal serà:

$$Sn_{trafo}[i]^2 \geq Qg_x[i]^2 + DPg_x[i]^2 \quad (\text{Eq. 35})$$

La potència reactiva que proporcionarà l'aerogenerador serà proporcional a la potència activa generada per ell mateix, per tant:

$$Qg_v[i] = \alpha[i] \cdot Pg_v[i] \quad (\text{Eq. 36})$$

5. Cas d'estudi

El model matemàtic general plantejat s'aplica a una xarxa en concret amb l'objectiu d'estudiar-ne el seu comportament. La xarxa elegida amb les seves característiques corresponents es presenten en aquest apartat.

5.1. Introducció

Amb la finalitat d'aplicar el model desenvolupat a una xarxa de distribució, s'han dut a terme un metodologia que serviria d'igual manera si el model matemàtic desenvolupat volgués ser aplicat a casos distints al presentat.

Primerament s'han establert les consideracions que es realitzen de la xarxa. Tot seguit s'ha elegit la xarxa d'estudi juntament amb les càrregues i generació connectades. Per acabar s'han establert els casos a analitzar així com també un criteri de qualitat energètica a tenir en compte. Finalment, s'ha aplicat el model matemàtic desenvolupat a la xarxa amb la utilització d'un programari de codi lliure.

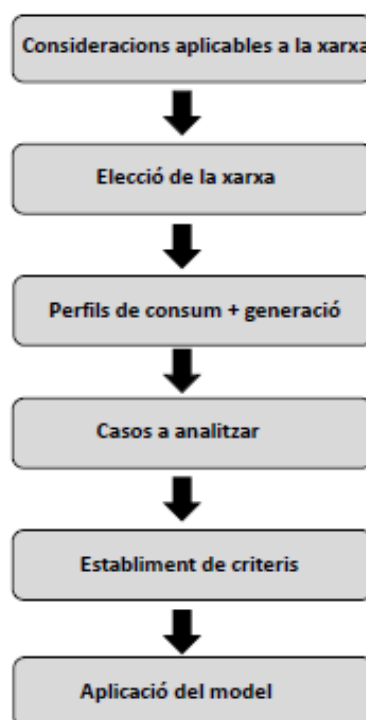


Figura 18. Esquema conceptual de la metodologia seguida en el cas d'estudi.

5.2. Consideracions aplicades

Per aplicar el model desenvolupat a la xarxa d'estudi presentada s'han realitzat una sèrie de consideracions:

- Les dades de previsió de càrregues i de generació màxima corresponent als generadors de font renovable (utilitzat en el model agregat predictiu) i de consum reals i de generació màxima real corresponent als generadors de font renovable (utilitzat en el model desagregat instantani) es mantenen constants.
- Els busos amb generació fotovoltaica no compten amb aerogeneradors instal·lats i viceversa.
- A la xarxa d'estudi tan sols hi ha un generador no renovable instal·lat. En el cas que aquest generador es trobi connectat entregant potència, no presenta un mínim de generació.
- Quan es parla de la capacitat del sistema d'emmagatzematge (*CapacitatBAT*) es fa referència a la capacitat útil. A més, el sistema d'emmagatzematge es troba connectat a la xarxa a través d'un convertidor.
- En el mateix bus on es troba instal·lat el generador no renovable, hi ha l'únic sistema d'emmagatzematge present a la xarxa. S'ha considerat la possibilitat que el sistema d'emmagatzematge fos distribuït de tal manera que cada bus on hi hagués generació disposés de capacitat d'emmagatzematge d'energia. No obstant, aquest plantejament s'ha descartat ja que d'acord amb distintes simulacions realitzades amb la presència de dos punts d'emmagatzematge i (1) es va arribar a la conclusió que era més òptim un sistema centralitzat.
- L'estudi de la xarxa és duu a terme amb increments de temps d'una hora. S'ha fet aquesta simplificació per reduir temps computacional del programa.

Amb les hipòtesis presentades anteriorment, es poden reescriure les equacions plantejades del model d'acord amb la naturalesa de cada bus. D'aquesta manera, al reduir paràmetres implicats en les equacions es disminueix el temps emprat per compilar i solucionar el model.

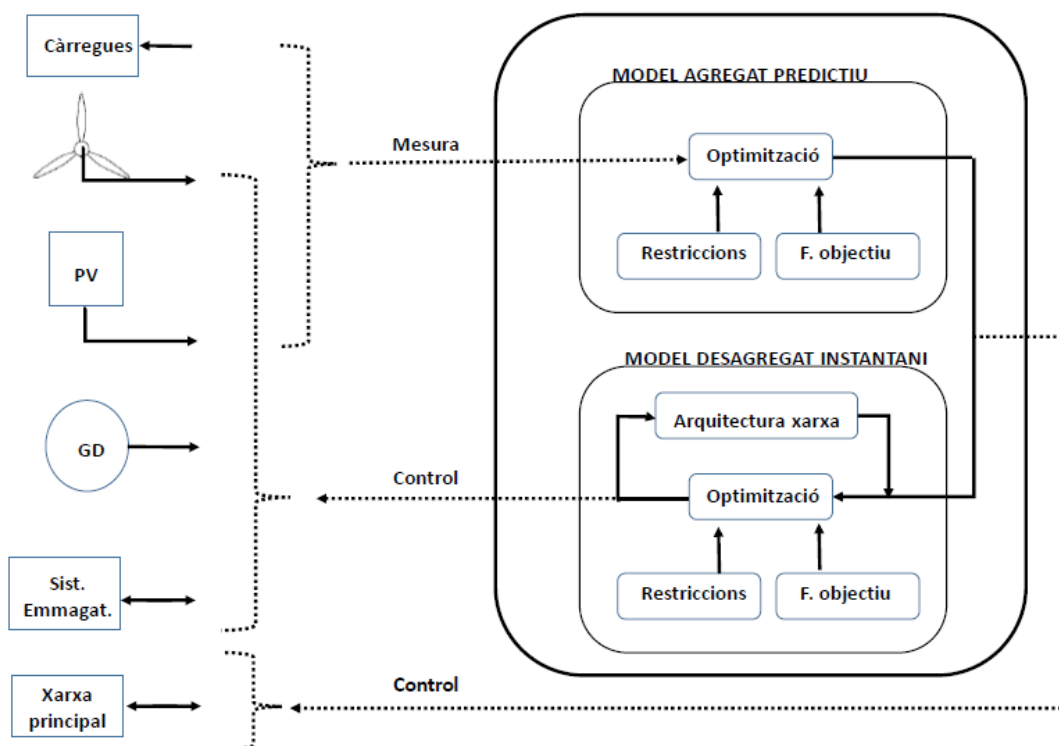


Figura 19. Esquema general del model desenvolupat aplicat al cas d'estudi.

5.3. Xarxa a estudiar

La xarxa d'estudi està composta per un total de 65 busos. D'aquests 65 busos, del bus 1 al 62 representen distints habitatges individuals els quals tenen un perfil de consum i la possibilitat d'un perfil de generació. El bus 63 correspon al punt de connexió de la xarxa d'estudi amb la xarxa principal mitjançant un transformador de 630 kVA de potència. En el bus 64 hi ha connectat el sistema d'emmagatzematge juntament amb un generador dièsel. El bus 65 (on no hi ha demanda ni generació) es correspon exclusivament a un punt de connexió de distintes branques de la xarxa d'estudi.

Taula 8. Característiques dels busos de la xarxa d'estudi.

Busos	Consum?	Generació de potència?
1 al 24 i 33 al 61	Sí	Mòduls fotovoltaics
25 al 32 i 62	Sí	Aerogeneradors
63	No	Xarxa elèctrica principal
64	No	Generador dièsel + sistema d'emmagatzematge
65	No	No

L'esquema de la xarxa es presenta en la següent figura:

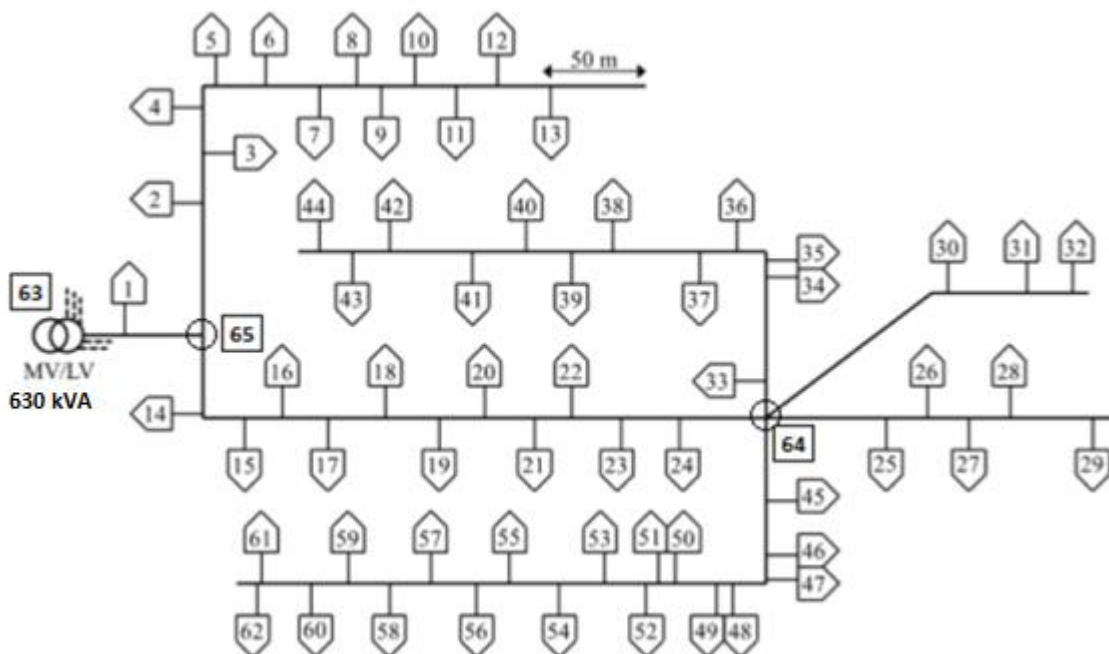


Figura 20. Esquema de l'arquitectura de la xarxa d'estudi. Font: (29).

Les línies que formen la xarxa d'estudi presenten una impedància de $1,150 + j0,083 \Omega/\text{km}$ i el transformador connectat al bus 63 una impedància de $0,004 + j0,020 \Omega$. (29).

El preu de compra d'energia (40) que s'ha considerat es presenta en el següent gràfic:

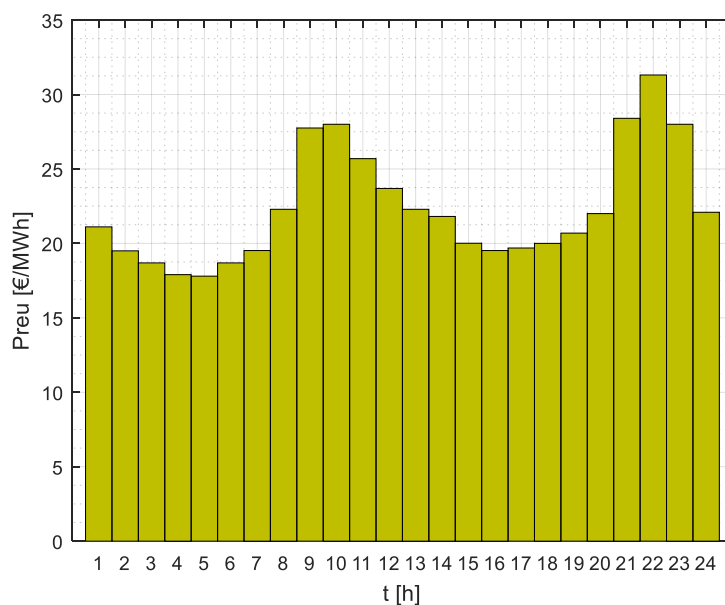


Figura 21. Escenari de preu considerat.

5.3.1. Perfils de demanda i generació

Les dades de demanda de potència activa i reactiva consumida a cada un dels busos s'han obtingut mitjançant el programari *LoadProfileGenerator* (41). Aquesta eina permet modelar el comportament de les persones en distints tipus d'habitatges i generar les corresponents corbes de demanda d'aigua potable, aigua calenta, gas o electricitat entre altres. No obstant, per la realització d'aquest treball tan sols és d'interès les corbes de potència activa i reactiva consumides.

Dels distints tipus d'habitatges que permet simular el programa, s'han elegit un total de 12 distints que pretenen representar la varietat d'habitatges que es poden localitzar en una zona. Aquests, d'acord amb la classificació que en fa el programa, són:

- *Family, 1 child, both at work*
- *Jak Jobless*
- *Couple, both at work*
- *Family, 2 children, parents without work*
- *Couple, 30 - 64 years, both at work, with homehelp*
- *Single woman under 30 years with work*
- *Single woman under 30 years without work*
- *Single man under 30 years without work*
- *Single man under 30 years with work*
- *Family with 2 children, 1 at work, 1 at home*
- *Student Flatsharing*
- *Couple with 2 children, husband at work*

La distribució d'aquests habitatges en la xarxa d'estudi és pot observar a la Figura 22.

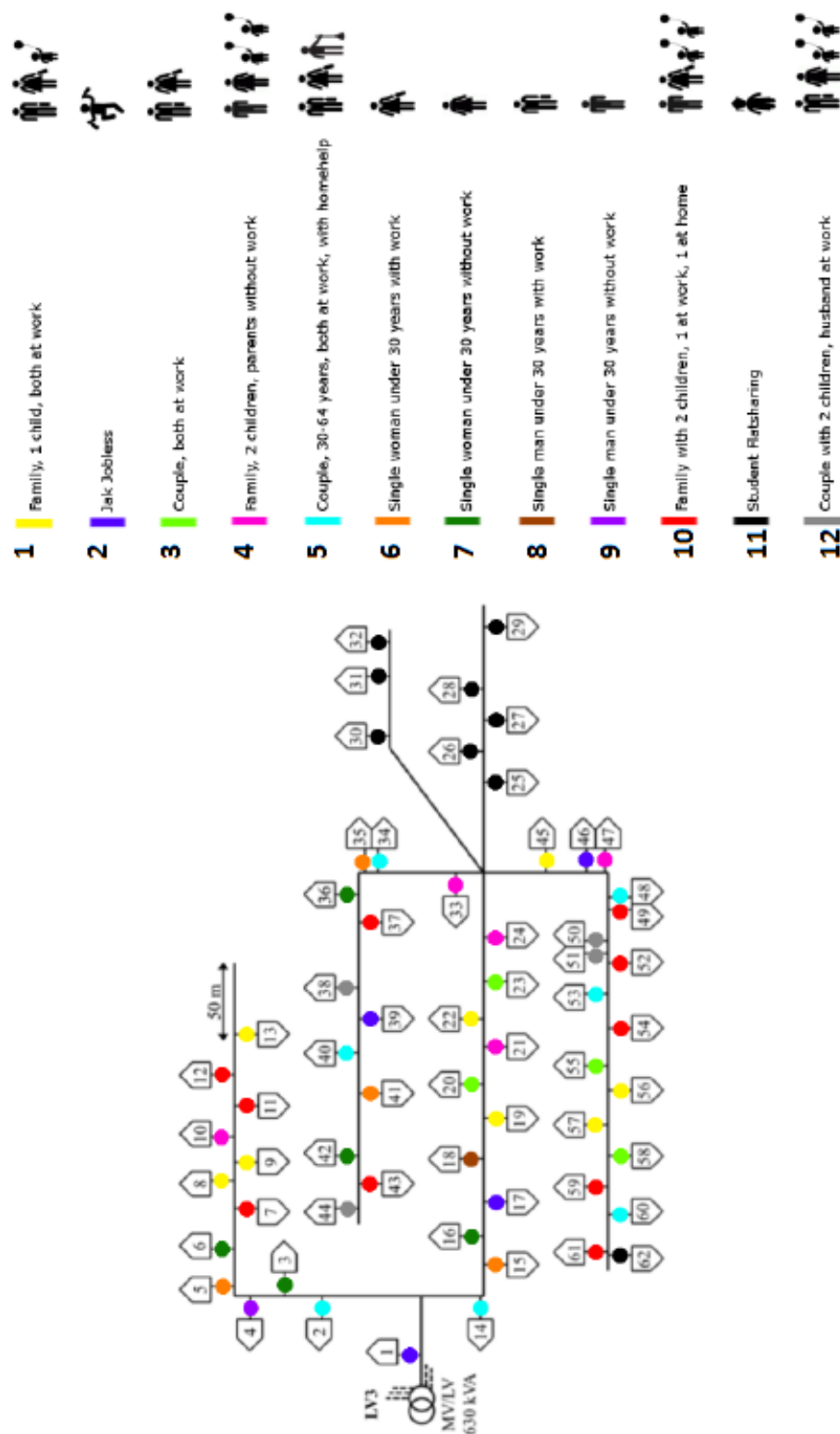


Figura 22. Esquema de distribució dels perfils elegits per cada habitatge. Font:(1).

La demanda total de potència activa i reactiva del conjunt de la xarxa es troba representada en els gràfics que venen a continuació.

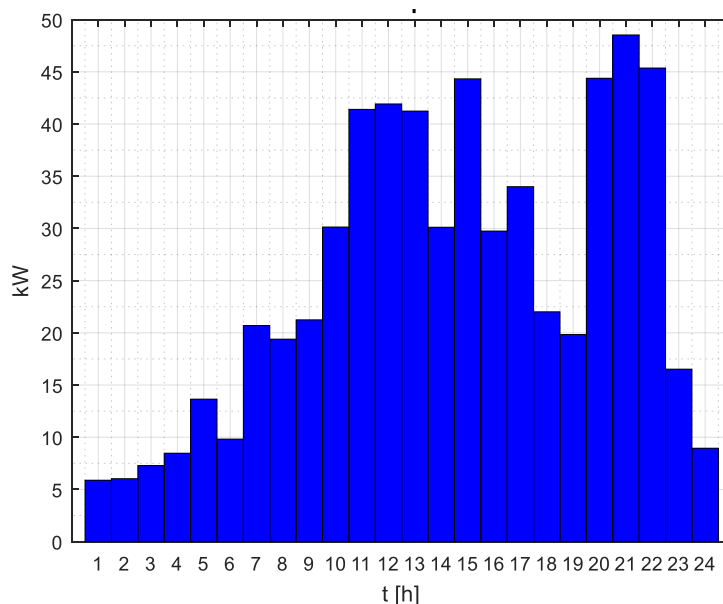


Figura 23. Gràfica de la demanda total de potència activa a la xarxa d'estudi.

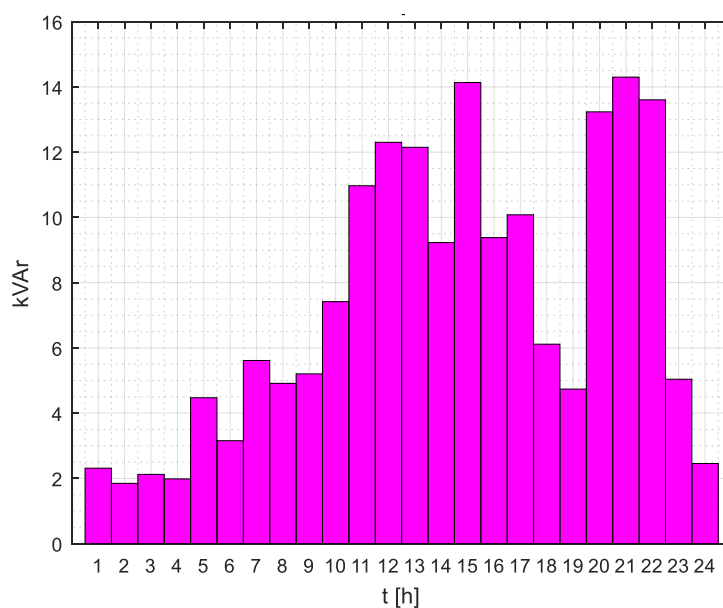


Figura 24. Gràfica de la demanda total de potència reactiva a la xarxa d'estudi.

En la taula que es presenta tot seguit es pot observar la corresponent potència fotovoltaica (P_{PV}) i la potència dels aerogeneradors (P_{vent}) instal·lats segons el perfil d'ocupació de l'habitatge. També es presenta el percentatge de penetració (Pen.) assignat a cada tipus d'habitatge. És a dir, cada un dels

habitatges tindrà o no instal·lades les plaques fotovoltaïques o aerogeneradors segons la penetració elegida. Si el valor de penetració de renovables a la xarxa és superior al valor de penetració assignat a l'habitatge, aleshores hi haurà el generador connectat. Per l'assignació dels percentatges de penetració a cada tipus d'habitatge s'ha intentat seguir un criteri econòmic: aquells habitatges amb un poder adquisitiu major seran els primers en instal·lar-ho.

Taula 9. P_{PV} i P_{Vent} instal·lada i percentatge de penetració segons el tipus d'habitatge.

Perfil d'ocupació	P_{PV} [kW]	P_{Vent} [kW]	Pen. [%]
<i>Family, 1 child, both at work</i>	2	0	30
<i>Jak Jobless</i>	1	0	100
<i>Couple, both at work</i>	2	0	40
<i>Family, 2 children, parents without work</i>	5	0	80
<i>Couple, 30 - 64 years, both at work, with homehelp</i>	5,5	0	10
<i>Single woman under 30 years with work</i>	1,5	0	70
<i>Single woman under 30 years without work</i>	2	0	90
<i>Single man under 30 years without work</i>	2	0	90
<i>Single man under 30 years with work</i>	1	0	70
<i>Family with 2 children, 1 at work, 1 at home</i>	5	0	50
<i>Student Flatsharing</i>	0	2	20
<i>Couple with 2 children, husband at work</i>	4,5	0	60

El perfil corresponent a un pis d'estudiants (*Student Flatsharing*) no disposa de plaques solars fotovoltaïques instal·lades. No obstant, disposen de generadors eòlics de 2 kW de potència nominal. La potència eòlica màxima que pot produir cada generador fotovoltaic és en funció de les característiques de l'aerogenerador elegit (42) i de l'escenari de velocitat del vent. S'estableix que la potència reactiva produïda per l'aerogenerador correspon al 10% de la potència activa generada per aquest.

Si bé és cert que la placa fotovoltaica tan sols és capaç de generar potència activa, el convertidor utilitzat per la connexió dels mòduls fotovoltaics (corrent continu) amb la xarxa elèctrica (corrent altern) permet regular tant la potència activa com la reactiva que es desitja generar (43). La potència aparent del convertidor s'estableix del mateix valor que la potència fotovoltaica instal·lada.

La radiació considerada per la determinació de la potència activa generada al llarg del dia pel conjunt fotovoltaic s'ha obtingut mitjançant el programari en línia *PVGIS* (44). L'escenari elegit correspon al més de juliol a la zona de Barcelona i es considera la mateixa radiació per tots els habitatges ja que la xarxa es troba a una àrea reduïda.

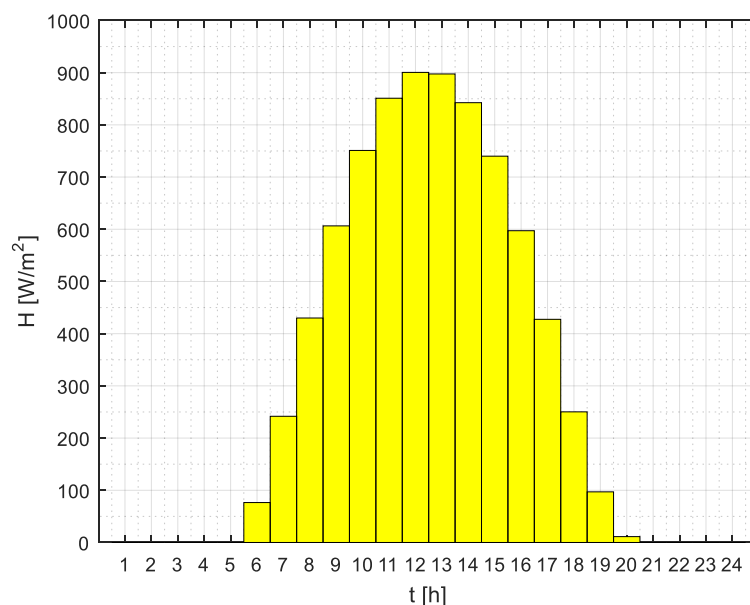


Figura 25. Perfil de radiació considerat en els casos estudiats.

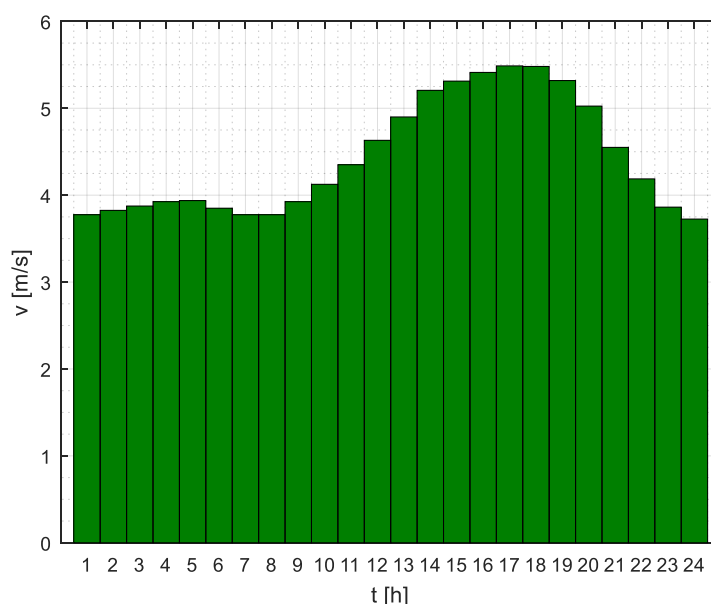


Figura 26. Perfil de vent considerat en els casos estudiats.

5.3.2. Sistema d'emmagatzematge

Referent al sistema d'emmagatzematge, la capacitat útil s'estableix en 3 vegades la potència instal·lada dels generadors renovables distribuïts (1).

L'eficiència de càrrega i descàrrega de l'energia en el sistema es considera la mateixa i s'estableix en un 90% i la potència aparent del convertidor utilitzat per la connexió del sistema d'emmagatzematge amb la xarxa es considera del mateix valor que la capacitat del sistema.

5.4. Presentació dels distints casos analitzats

S'analitzen tres casos de penetració de renovables (alta, mitja i baixa) amb el mateix perfil de radiació i de vent per tal que els resultats obtinguts puguin ser analitzats i comparats.

Cas 1 de penetració:

- Potència nominal instal·lada: 1768,5 kW (100% de nivell de penetració).
- Capacitat del sistema d'emmagatzematge instal·lat: 589,5 kW.

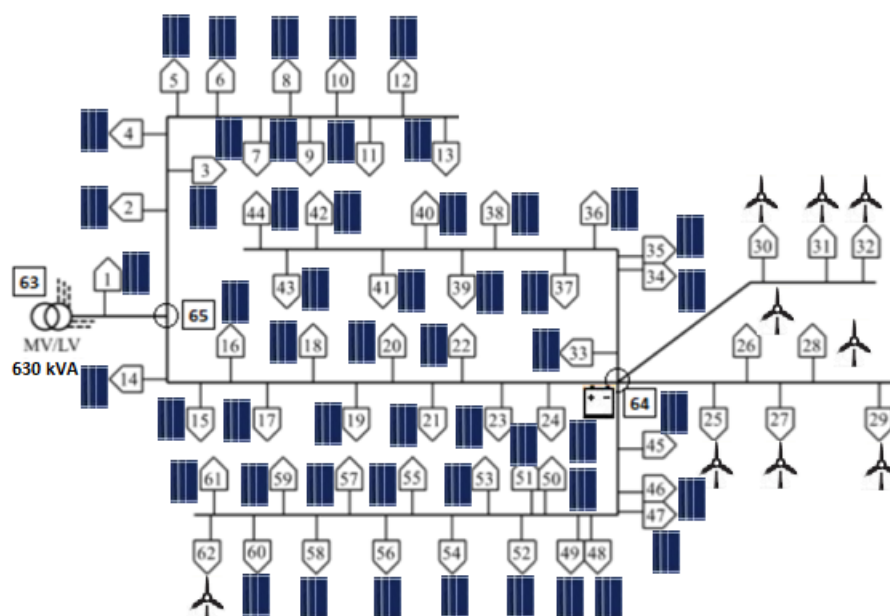


Figura 27. Generació renovable instal·lada pel cas 1 de penetració de renovables considerat.

Cas 2 de penetració:

- Potència nominal instal·lada: 1174,5 kW (50% de nivell de penetració).
- Capacitat del sistema d'emmagatzematge instal·lat: 391,5 kW.

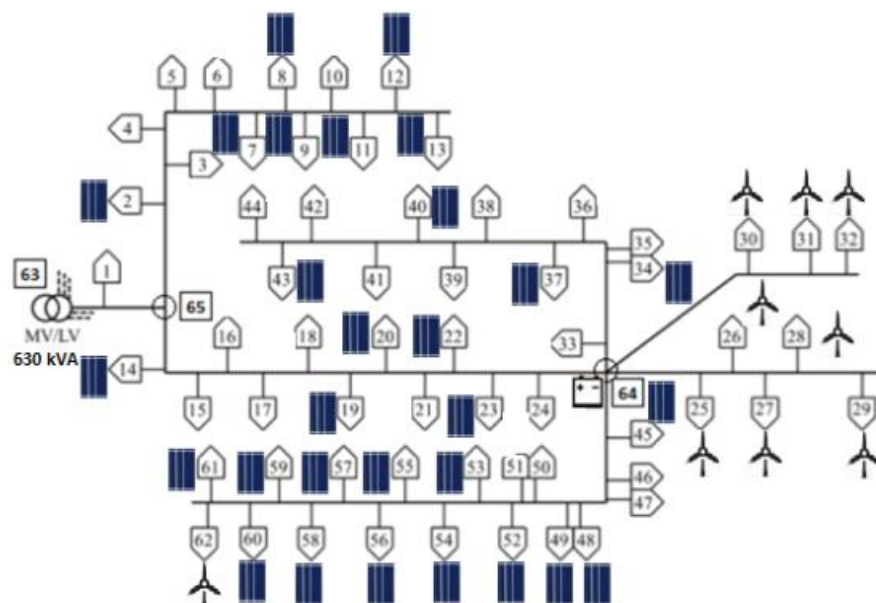


Figura 28. Generació renovable instal·lada pel cas 2 de penetració de renovables considerat.

Cas 3 de penetració:

- Potència nominal instal·lada: 652,5 kW (30% de nivell de penetració).
- Capacitat del sistema d'emmagatzematge instal·lat: 217,5 kW.

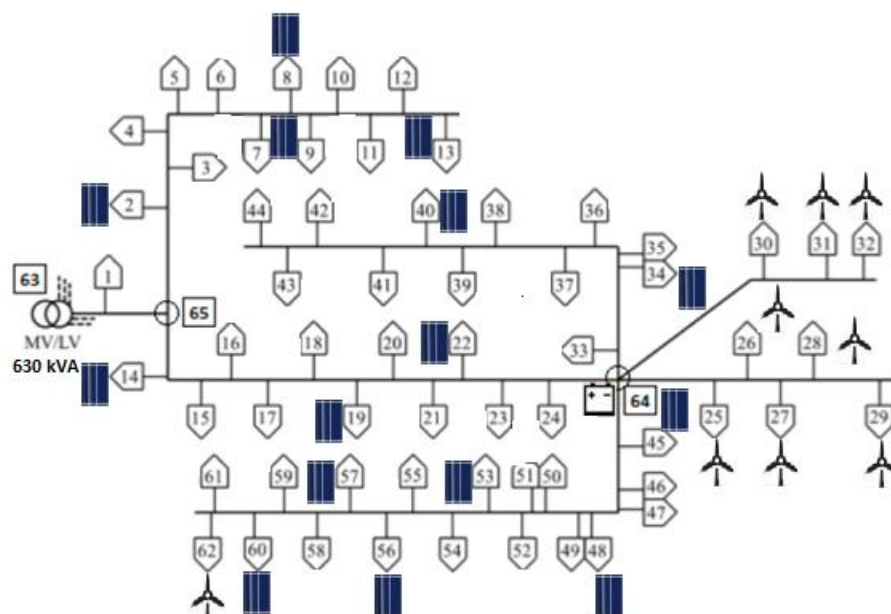


Figura 29. Generació renovables instal·lada pel cas 3 de penetració de renovables considerat.

En cada un dels casos s'apliquen quatre mètodes distints per establir la generació de potència i la regulació del sistema d'emmagatzematge.

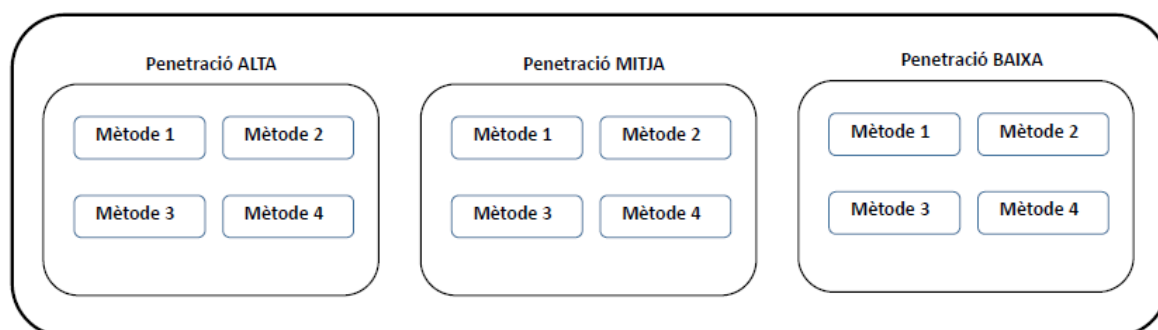


Figura 30. Esquema de la metodologia seguida per presentar els resultats.

Mètode 1:

- És un mètode simple que sol ser utilitzat gràcies a la poca gestió que es duu a terme (1).
- Els generadors de font renovable no són controlables i generen el màxim possible. Per tant, no hi ha un control de la potència activa generada.
- L'energia generada no consumida és carregada al sistema d'emmagatzematge. La que no té cabuda al sistema d'emmagatzematge quan aquest es troba al seu màxim és injectada a la xarxa principal.
- La potència reactiva necessària prové exclusivament del bus del transformador.
- Si hi ha demanda energètica que no pot ser satisfeta amb la generació renovable, aquesta és satisfeta amb l'energia que té emmagatzemada el sistema d'emmagatzematge. En el cas que el sistema no es trobi carregat serà satisfeta per la xarxa principal.

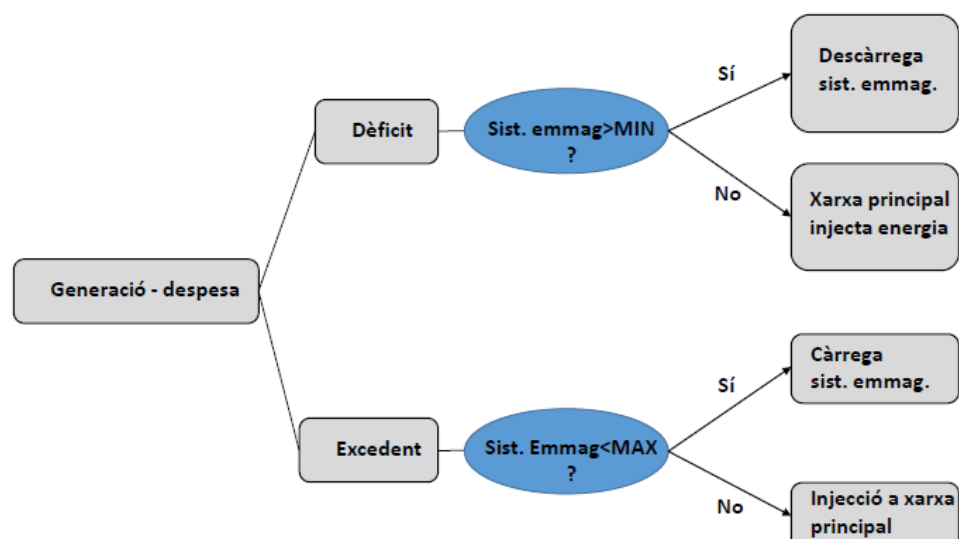


Figura 31. Diagrama conceptual del funcionament del primer mètode.

Mètode 2:

- La generació de potència activa s'estableix d'acord amb els resultats obtinguts amb el model agregat predictiu. Per exemple, si el model estableix que la generació òptima de renovables és del 70% del total, cada generador renovable generarà el 70% del seu màxim.
- No hi ha injecció de potència activa a la xarxa principal.
- La potència reactiva necessària prové exclusivament del bus del transformador.
- Aquí es tenen en compte les previsions i costos de generació.

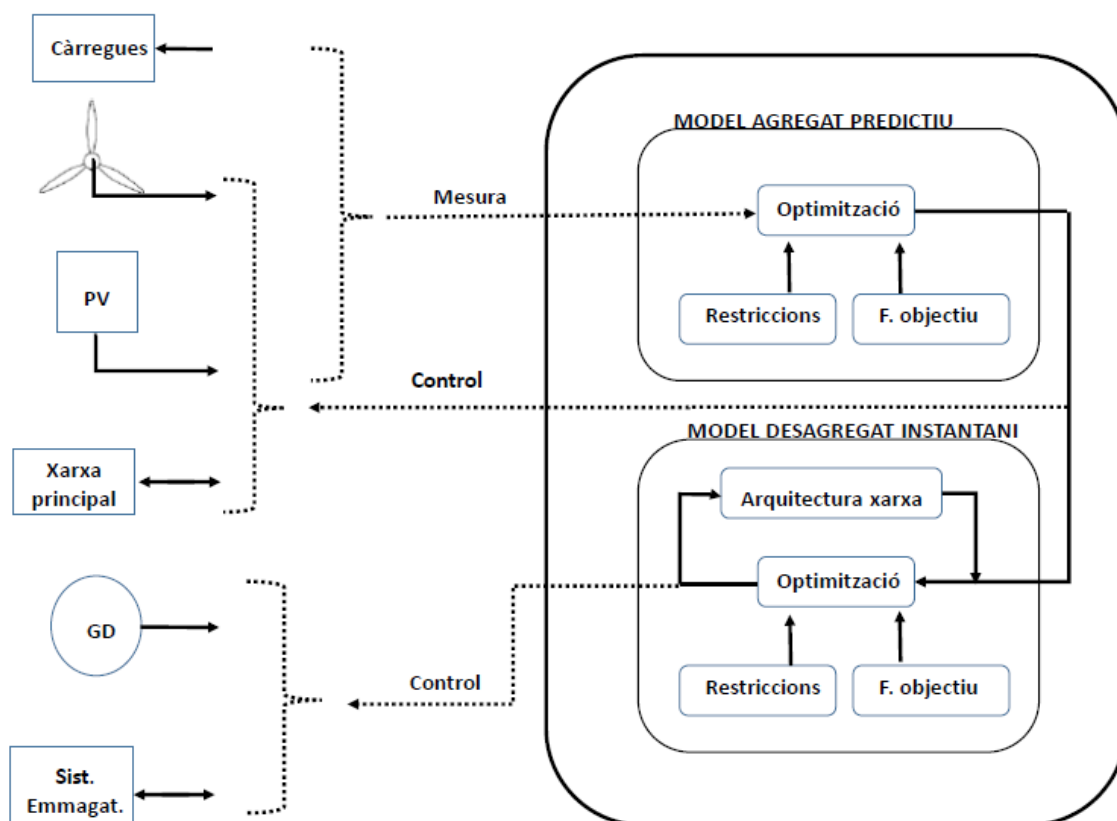


Figura 32. Diagrama conceptual del funcionament del segon mètode.

Mètode 3:

- Correspon al model desenvolupat en aquest treball amb les hipòtesis realitzades. Conseqüentment hi ha una regulació de la generació de potència activa.
- La potència reactiva necessària prové exclusivament del bus del transformador. És a dir, els convertidors utilitzats no tenen capacitat de generar potència reactiva.

Mètode 4:

- Correspon al mètode anterior amb el complement de la regulació de la potència reactiva. És a dir, la potència reactiva generada pot provenir del bus del transformador així com també d'altres busos que disposen de convertidors amb la capacitat de proporcionar potència reactiva de forma controlada.

5.5. Criteris de qualitat energètica

Tot seguit es presenten uns criteris amb l'objectiu de poder quantificar i comparar la qualitat del subministre elèctric:

- D'acord amb l'estàndard EN50160, les tensions de la xarxa de distribució de baixa tensió han de romandre dintre d'uns límits de variació de $\pm 10 \%$ respecte el seu valor nominal. També en les "*Condiciones Técnicas y de Seguridad de las Instalaciones de Distribución de FECSA ENDESA*" s'estableix un rang permès per la caiguda de tensió. Estableix que no serà major del 7%. És a dir, com més propera es trobi la tensió dels busos (V_i) a la tensió nominal (V_n), millor.
- Entre els objectius claus de la Unió Europea pel 2020, es troba la reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle respecte l'any 1990 en un 20%. Amb la integració de les energies renovables pretén que el 20% del consum total d'energia procedeixi de l'aprofitament de les fonts renovables i que l'eficiència energètica es vegi incrementada en un 20% (45). Conseqüentment, una participació major dels generadors renovables en la generació per satisfer el consum en serà un bon indicador.
- Una gran quantitat de pèrdues a la xarxa no serà un bon indicador ja que s'està malbaratant energia. No obstant, cal mirar si l'augment de pèrdues va o no lligat a la disminució de generació d'origen no renovable.

5.6. Aplicació del model matemàtic desenvolupat

El model s'ha aplicat amb un llenguatge de programació de codi lliure, *Julia* (46). Alhora, s'ha utilitzat el *Jump* (47), un llenguatge de modelatge de domini específic per a l'optimització matemàtica mitjançant *Julia* i per l'escriptura del codi s'ha fet servir l'editor de text *Atom* (48).

Jump actualment suporta distints solucionadors (lliures i comercials) capaços de donar resposta a una gran varietat de problemes. Entre els solucionadors existents se n'han escollit dos per aplicar el model. Pel model agregat predictiu s'ha elegit el *Cbc* (49) i pel model desagregat instantani l'*Ipopt* (50), ambdós

de codi obert. S'han elegit el Cbc i l'Ipopt ja que permeten resoldre problemes d'optimització del tipus programació lineal entera mixta i programació no lineal respectivament.

Per dur a terme les distintes simulacions s'han creat distints fitxers:

- Dos fitxers de càlcul (*Excel*) que contenen les dades de la xarxa.
- Tres fitxers *Matlab*. Dos d'ells per preparar les dades per ser utilitzades en els fitxers *Julia* i un per tractar els resultats. Els fitxers construïts per la preparació de les dades a utilitzar pels fitxers *Julia*, construeixen matrius i vectors de paràmetres d'acord amb la configuració de la xarxa realitzada mitjançant el fitxer de càlcul. En el cas que la configuració desitgi ser canviada, les matrius de dades (paràmetres) són construïdes igualment ja que es troba automatitzat.
- Dos fitxers *Julia* per aplicar cada un dels models desenvolupats.

La connexió entre *Matlab-Julia* i *Julia-Matlab* es realitza a través de fitxers *.txt* generats de forma automàtica en executar els altres fitxers.

En l'esquema que es presenta tot seguit es pot observar la correlació entre els distints fitxers emprats:

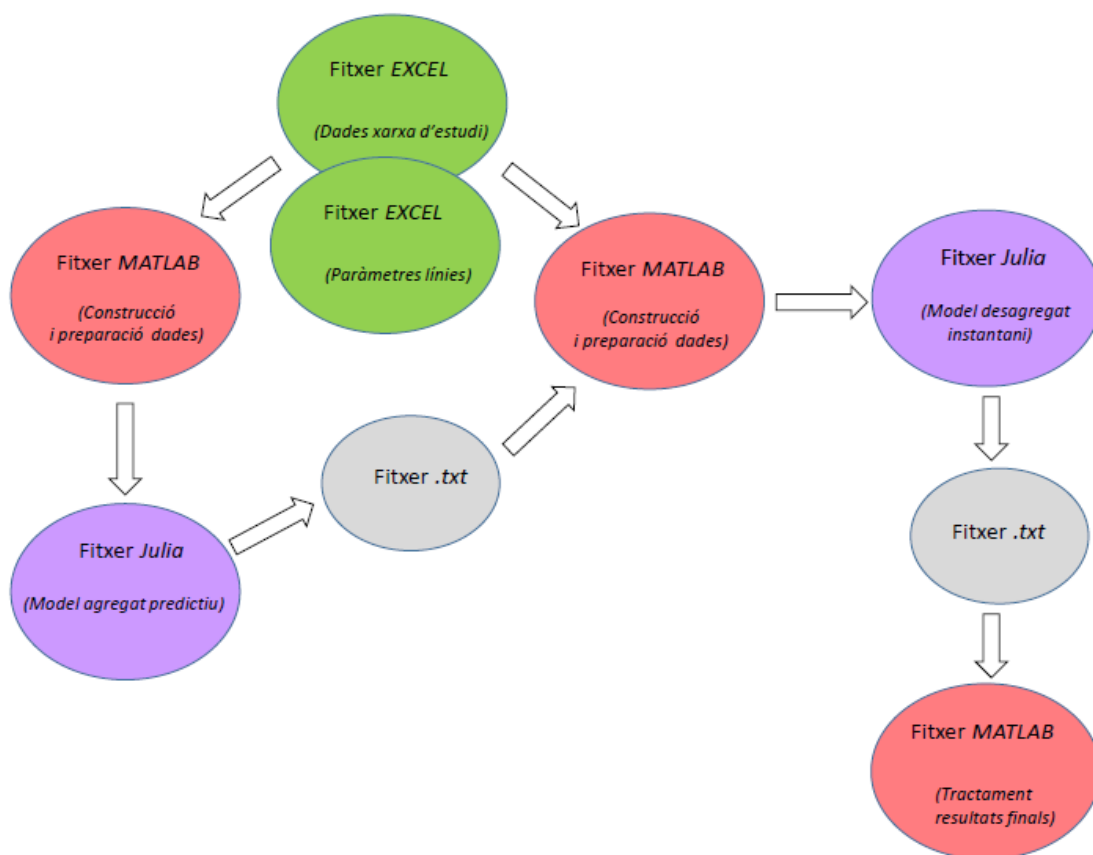


Figura 33. Esquema representatiu de la interacció entre els distints arxius.

5.6.1. Diagrama de blocs de l'escriptura del model en *Julia*

En aquest apartat s'indica l'estructura que presenta el fitxer *Julia* amb la finalitat de resoldre els models desenvolupats. Com es pot observar a la Figura 34, el model agregat predictiu s'aplica només un cop. Per contra, el model desagregat instantani, Figura 35, s'aplica cíclicament per tots els instants de temps considerats tal i com indiquen les fletxes utilitzades.

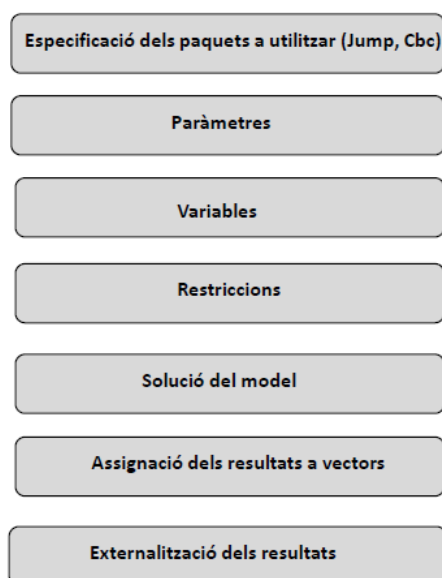


Figura 34. Diagrama de blocs de l'estructura del model agregat predictiu.



Figura 35. Diagrama de blocs de l'estructura del model desagregat instantani.

6. Resultats obtinguts i anàlisi

En aquest apartat es presenten i analitzen els distints resultats obtinguts per tres nivells de penetració de renovables aplicant els quatre mètodes a cada un d'ells. Es presenta:

- **La generació de potència activa a la xarxa.**

Es presenta en gràfics de barres acumulatives i la llegenda de colors utilitzada és comuna en tots ells. L'eix d'abscisses fa referència al temps al llarg del període considerat (1 dia) en intervals d'una hora. L'eix d'ordenades representa la potència en kW en intervals de 20.

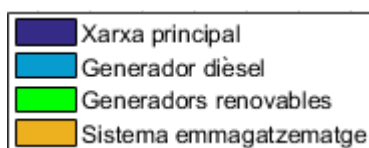


Figura 36. Llegenda de colors de la procedència de la potència activa generada.

- **La despesa de potència activa a la xarxa.**

També es presenta en gràfics de barres acumulatives i la llegenda de colors utilitzada és comuna en tots ells. Una ampliació de la representació de les pèrdues es troba a l'Annex C. Els eixos són idèntics als corresponents als gràfics de generació de potència activa.

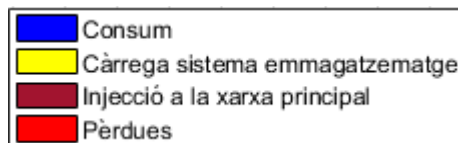


Figura 37. Llegenda de colors de la destinació de la potència activa generada.

- **L'estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge, SOC (51):**

$$SOC(\%) = \frac{\text{Energia disponible}}{\text{Capacitat màxima}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 37})$$

L'eix d'abscisses fa referència al temps al llarg del període considerat (1 dia) en intervals d'una hora. L'eix d'ordenades representa el percentatge de l'estat de càrrega (0% a 100%) en increment de 10.

- **La tensió a la xarxa:**

- El pitjor perfil de tensió de bus per cada mètode.

Es considera pitjor perfil aquell bus (i) que presenta més allunyament d'1 pu al llarg del dia:

$$desv(i) = \left(\sum_{t=1}^{temps} |1 - V(i, t)| \right) \quad (\text{Eq. 38})$$

En els perfils de tensió graficats, l'eix d'abscisses fa referència al temps al llarg del període considerat (1 dia) en intervals d'una hora. L'eix d'ordenades representa el valor de la tensió en pu i es troba entre 0,8 i 1,2 amb intervals de 0,05.

- Valor de tensió màxima ($V_{màx}$) al llarg del període considerat.
- Valor de tensió mínima ($V_{mín}$) al llarg del període considerat.
- Valor de tensió mitjana ($V_{mitjana}$) a la xarxa al llarg del període considerat.

Tots quatre mètodes són representats en la mateixa figura amb l'objectiu de poder comparar a simple vista les diferències entre ells. L'apartat "a" correspon al mètode 1, l'apartat "b" al mètode 2, l'apartat "c" al mètode 3 i l'apartat "d" al mètode 4.

(a) Mètode 1	(b) Mètode 2
(c) Mètode 3	(d) Mètode 4

Figura 38. Col·locació del mètode a la gràfica en cada una de les gràfiques representades.

Tots els gràfics es presenten en la mateixa escala amb la finalitat que la comparació entre ells sigui fàcilment visualitzable a primer cop d'ull.

6.1. Nivell alt de penetració de renovables

6.1.1. Generació

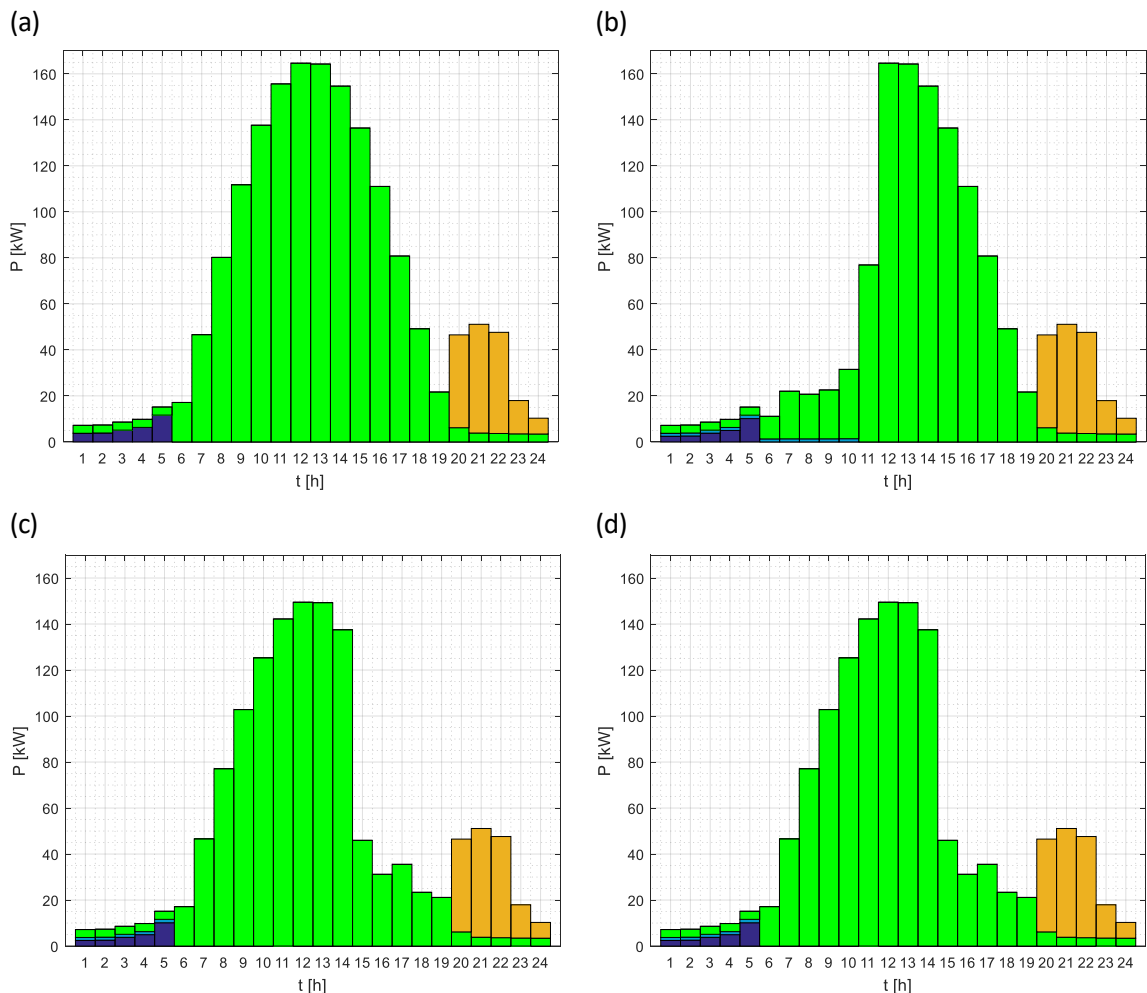


Figura 39. Generació amb un alt nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.

Per un alt nivell de penetració de generació distribuïda en forma de generadors renovables, es pot observar que tan sols es consumeix potència procedent de la xarxa principal (blau fosc) al principi del dia ja que no és suficient la generació de renovables (verd clar). A més, en tots quatre mètodes el sistema d'emmagatzematge (ocre) proporciona potència al final del dia.

En el mètode 2 (Figura 39.b), 3 (Figura 39.c) i 4 (Figura 39.d) hi ha generació per part del generador dièsel (blau cel) en els instants que hi ha injecció de potència de la xarxa principal a la xarxa d'estudi. Això és deu a què la potència procedent de la xarxa principal és establerta amb el model agregat predictiu i en aplicar el model desagregat instantani (considera les característiques de la xarxa) és necessari més potència de la que en un primer moment s'havia establert. En el mètode 2 (Figura 39.b), la generació dièsel és present en més instants perquè al fixar la generació de renovables sense tenir en

compte les característiques de la xarxa provoca un dèficit de potència que és satisfet amb el generador dièsel d'acord amb el model desenvolupat. Tot i així, la generació dièsel és reduïda i conseqüentment quasi no es apreciable a la gràfica.

El perfil global de generació aplicant el mètode 3 (Figura 39.c) i 4 (Figura 39.d) és quasi idèntic. Tan sols es diferencien en què a l'hora 17, la generació renovable en el mètode 4 (Figura 39.d) és major. A més, ambdós mètodes presenten un pic de generació màxima menor als dels mètode 1 (Figura 39.a) i 2 (Figura 39.b).

Taula 10. $P_{g_{NR}}$ per un alt nivell de penetració de renovables.

Mètode	$P_{g_{NR}} [kW]$
1	30,63
2	37,22
3	30,57
4	30,57

La generació de potència d'origen no renovable que es correspon a la potència procedent de la xarxa principal i el generador dièsel (blau fosc i blau cel) és molt similar en els mètodes 1 (Figura 39.a), 3 (Figura 39.c) i 4 (Figura 39.d); en canvi, pel mètode 2 (Figura 39.b) experimenta un augment. Tot i així, tots quatre valors són molt semblants tal i com es pot observar a la Taula 10.

6.1.2. Despesa

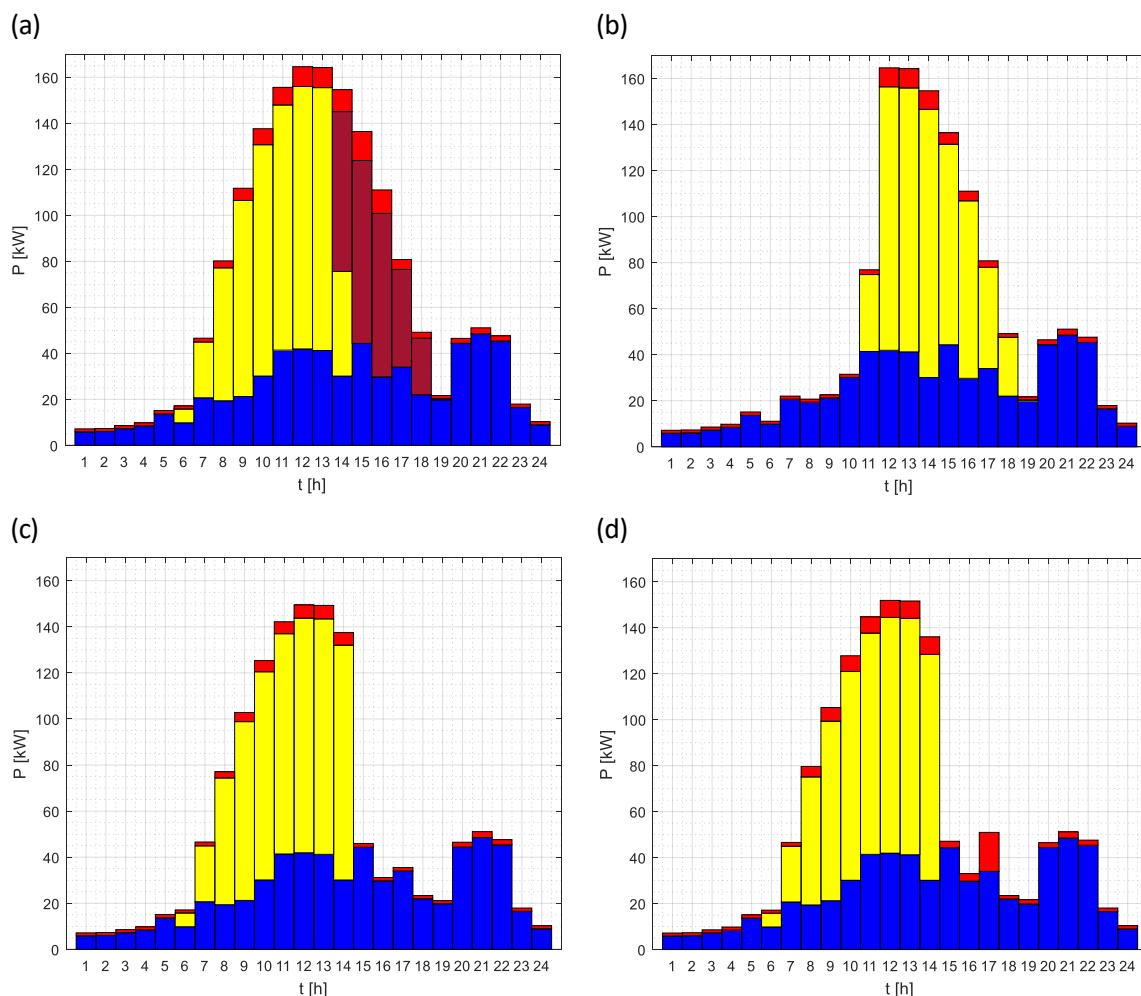


Figura 40. Despesa amb un alt nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.

Per alta penetració de renovables, aplicant el mètode 1 (Figura 40.a) s'observa injecció de potència a la xarxa principal (vermell oscur) a partir de l'instant que el sistema d'emmagatzematge es troba a la seva màxima capacitat.

Taula 11. Pèrdues amb un alt nivell de penetració de renovables.

Mètode	Pèrdues globals [kW]
1	100,16
2	64,56
3	60,03
4	92,87

La utilització del mètode 1 (Figura 40.a) és el que presenta més pèrdues seguit del mètode 4 (Figura 40.d). Per contra, el mètode 2 (Figura 40.b) i 3 (Figura 40.c) presenten pèrdues menors. No obstant, aquest augment de pèrdues no va lligat a un augment de generació de potència de font no renovable.

Una representació de les pèrdues a una escala major es pot trobar a Figura 52.

6.1.3. Estat de càrrega de la bateria

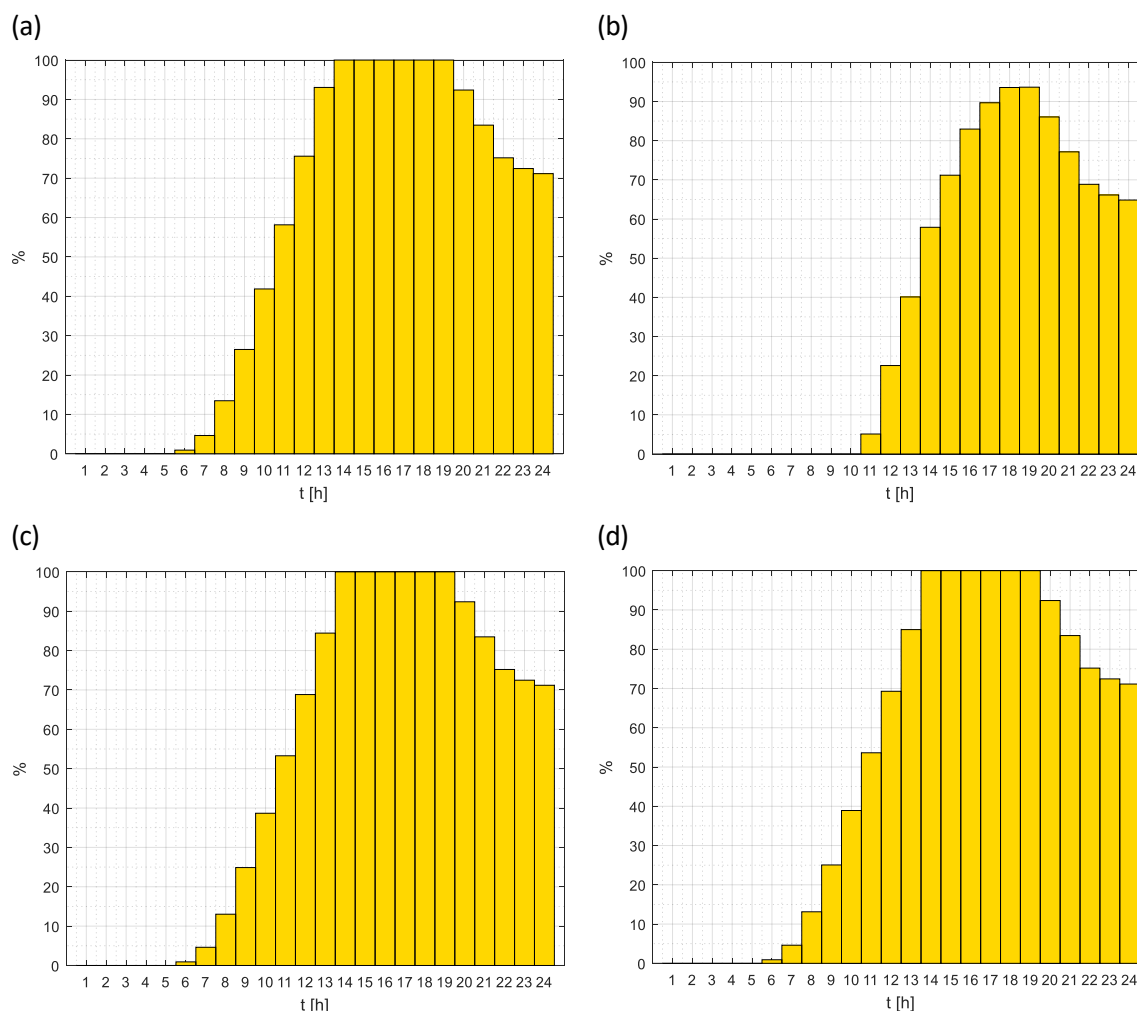


Figura 41. SOC amb un alt nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.

L'estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge aplicant el mètode 1 (Figura 41.a), 3 (Figura 41.c) o 4 (Figura 41.d) és el mateix. No obstant, en el mètode 2 (Figura 41.b) no és així perquè al fixar la generació de renovables sense tenir en compte les característiques de la xarxa provoca un dèficit de potència i conseqüentment el sistema no es pot carregar tant.

6.1.4. Tensió

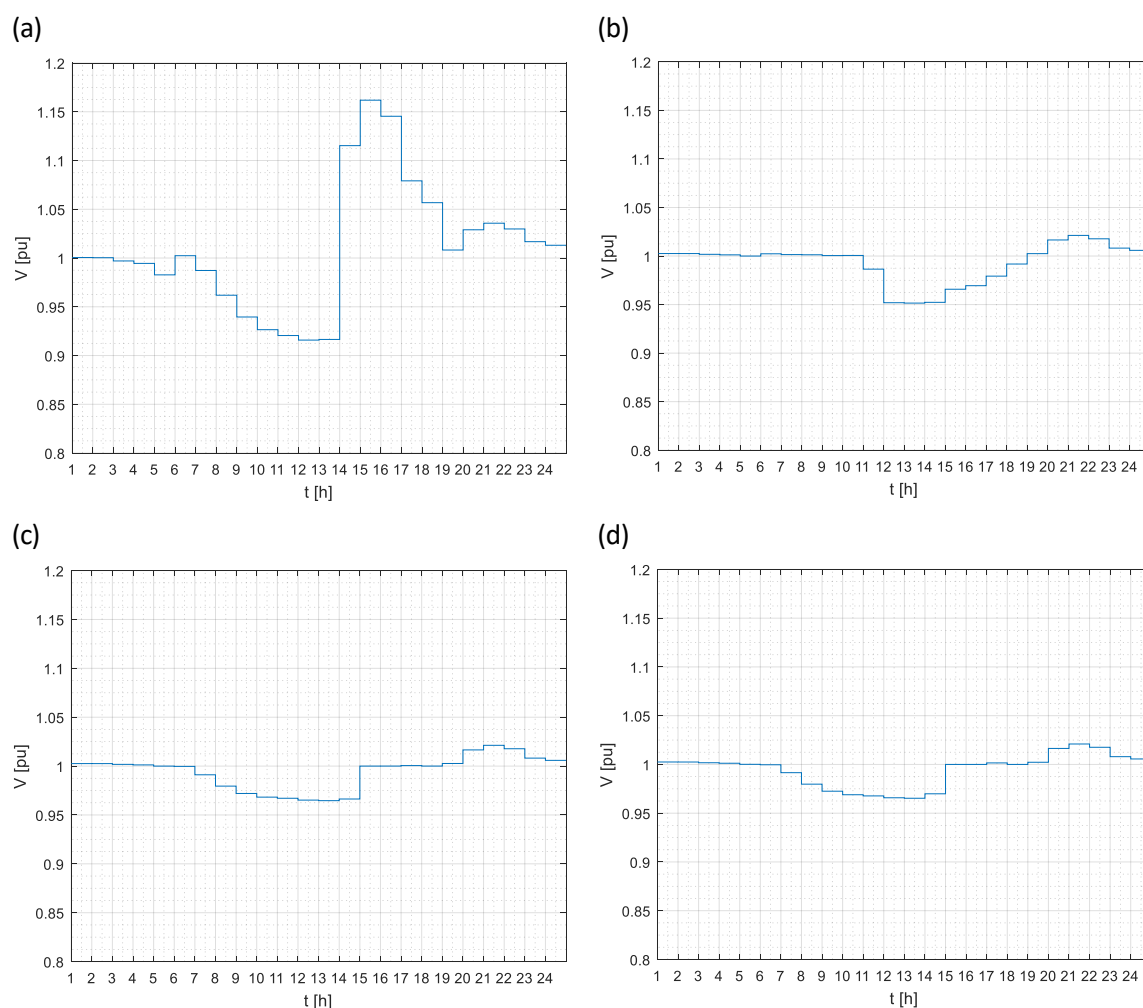


Figura 42. Busos que presenten el pitjor perfil de tensió amb un alt nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.

Amb l'aplicació del primer mètode (Figura 42.a), la tensió en els busos presenta variacions de magnituds considerables. En el gràfic es pot observar com la tensió en el bus 64 va de 0,91 pu a 1,16 pu aproximadament. El salt que s'observa a les 14 hores coincideix amb la càrrega completa del sistema d'emmagatzematge (Figura 41.a) i el conseqüent inici d'injecció de potència a la xarxa principal (Figura 40.a). Cal dir, que les quatre representacions dels perfils de tensió corresponen al bus 64.

Taula 12. Tensió màxima, mínima i mitjana amb un alt nivell de penetració de renovables.

Mètode	$V_{m\grave{a}x}[pu]$	$V_{m\grave{i}n}[pu]$	$V_{mitjana}[pu]$
1	1,2008	0,9158	1,0142
2	1,0653	0,9515	1,0002
3	1,0329	0,9646	1,0001
4	1,0312	0,9653	1,0001

Relatiu a la tensió, interessa que es trobi el més proper a 1 pu possible. És a dir, com més proper a 1 pu es trobin els màxims i mínims, millor. Dit això, com es pot comprovar a la Taula 12, per un alt nivell de penetració de renovables ocorre aplicant el mètode 4. Tot i així, el mètode 3 està ben aprop. El pitjor mètode és l'1 ja que el rang es troba a (0,91 pu – 1,2 pu).

6.2. Nivell mitjà de penetració de renovables

6.2.1. Generació

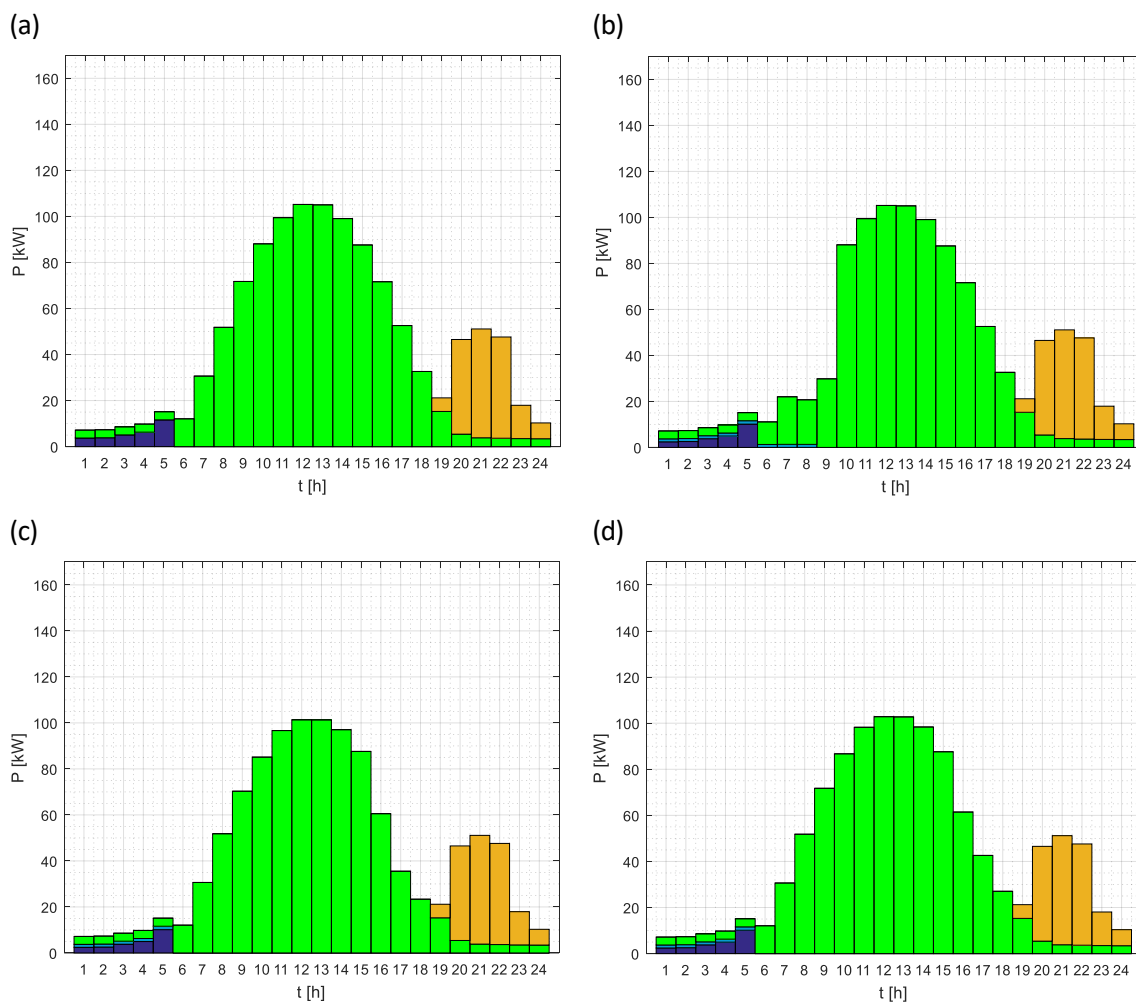


Figura 43. Generació amb un nivell mitjà de penetració aplicant cada un dels mètodes.

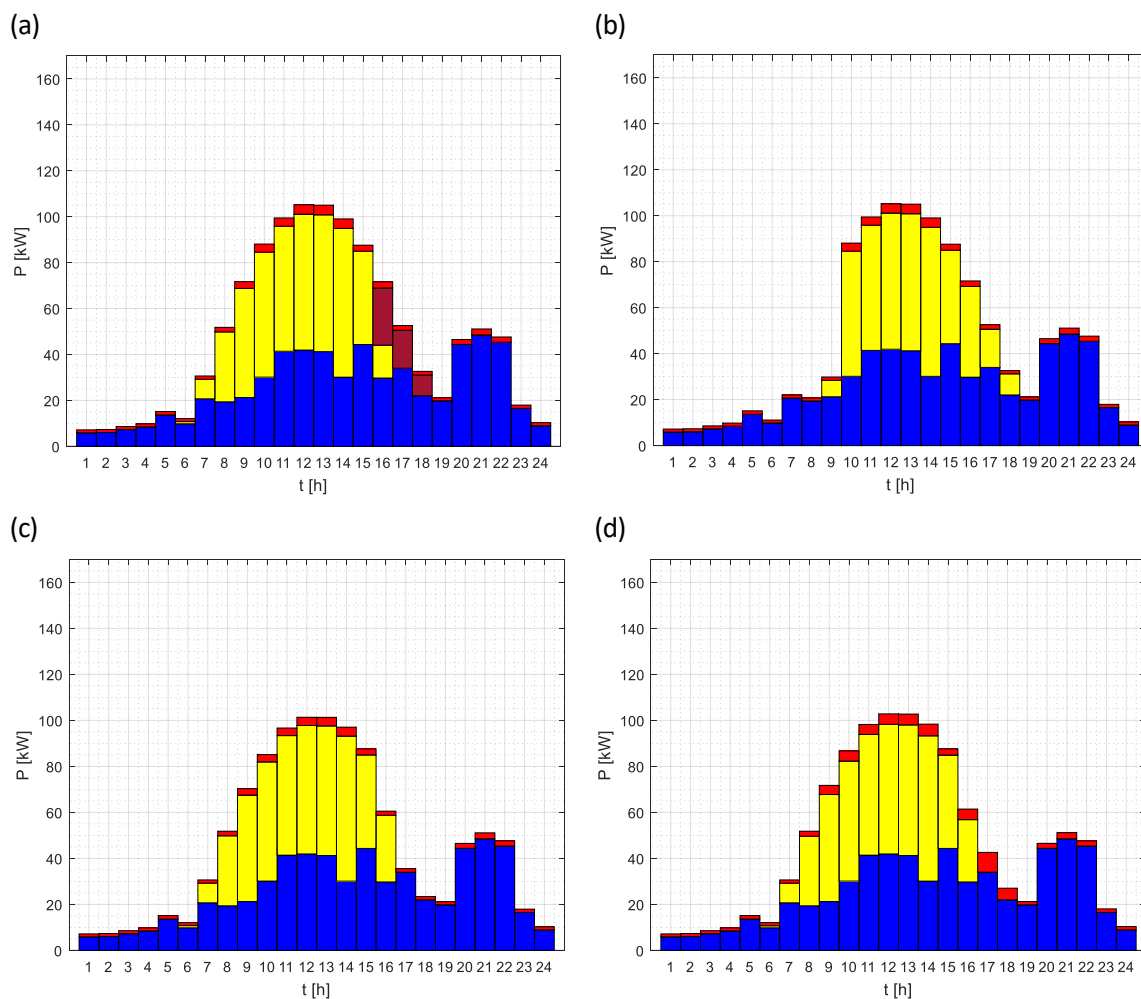
El comportament que experimenta la potència de generació pel nivell mitjà de penetració de renovables considerat (Figura 43) és molt similar al que experimentaven la generació en el cas de penetració màxima (Figura 39) però amb una escala més reduïda.

Taula 13. Pg_{NR} per un nivell mitjà de penetració de renovables.

Mètode	Pg_{NR} [kW]
1	30,63
2	34,53
3	30,57
4	30,57

6.2.2. Despesa

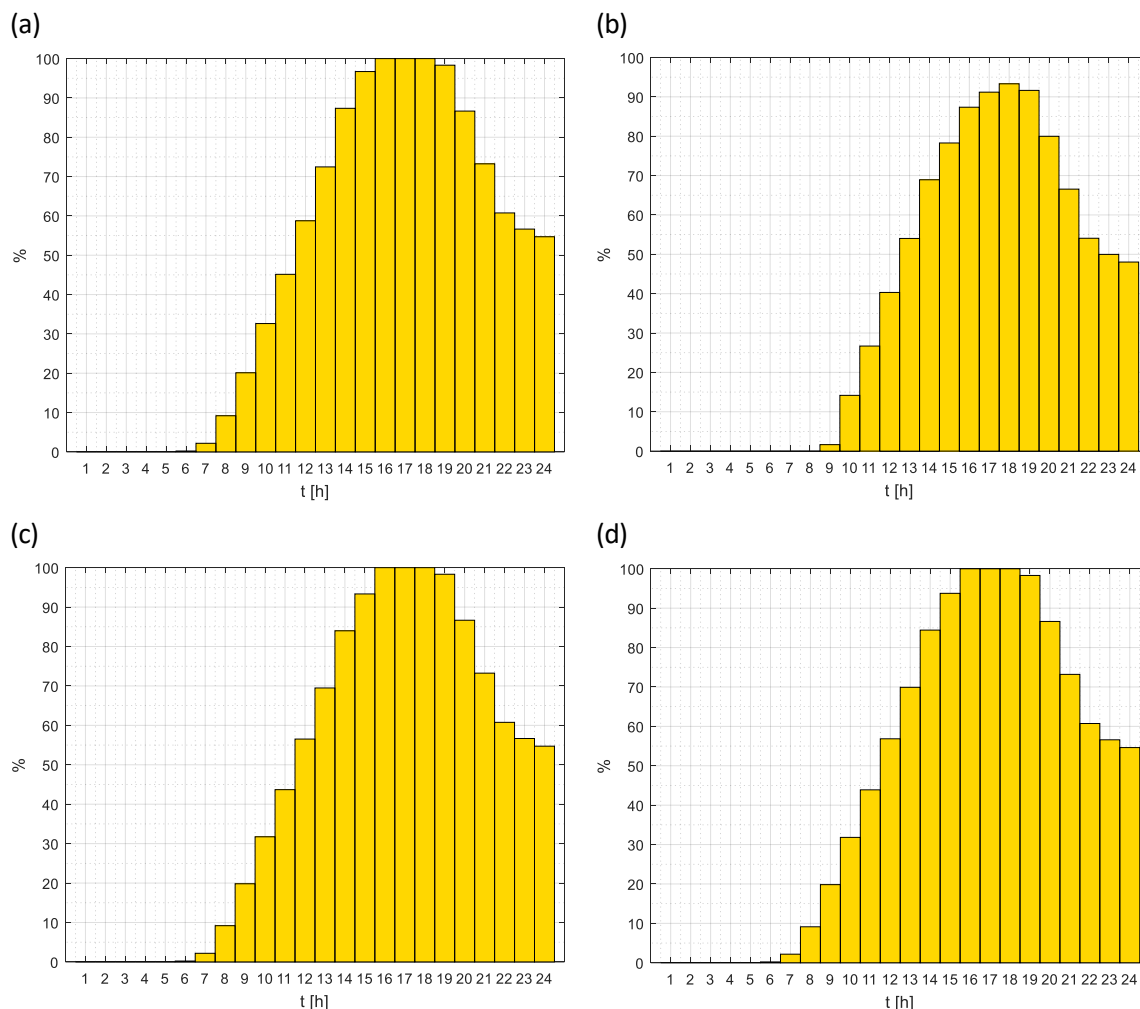
A l'haver disminuït la penetració de renovables, també n'ha disminuït la quantitat de potència injectada a la xarxa principal (vermell oscur).

**Figura 44.** Despesa amb un nivell mitjà de penetració aplicant cada un dels mètodes.

Pel nivell mitjà de penetració considerat, el mètode que més pèrdues presenta és el 4 (Figura 44.d). No obstant, no no van lligades a un augment de la potència generada d'origen no renovable (Taula 13).

Taula 14. Pèrdues amb un nivell mitjà de penetració de renovables.

Mètode	Pèrdues globals [kW]
1	53,90
2	50,78
3	50,05
4	70,87

6.2.3. Estat de càrrega de la bateria**Figura 45.** SOC amb un nivell mitjà de penetració aplicant cada un dels mètodes.

De la mateixa manera que s'ha vist amb un alt nivell de penetració de renovables (Figura 41), l'estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge presenta el mateix perfil aplicant el mètode 1 (Figura 45.a), 3 (Figura 45.c) i 4 (Figura 45.d). No obstant, en el mètode 2 (Figura 45.b) no és així pel mateix motiu que s'ha indicat per l'estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge amb un alt nivell de penetració de renovables. És a dir, en el mètode 2 s'estableix la generació de renovables sense tenir en compte les

característiques de la xarxa, hi ha un dèficit de potència i conseqüentment el sistema no es pot carregar tant.

6.2.4. Tensió

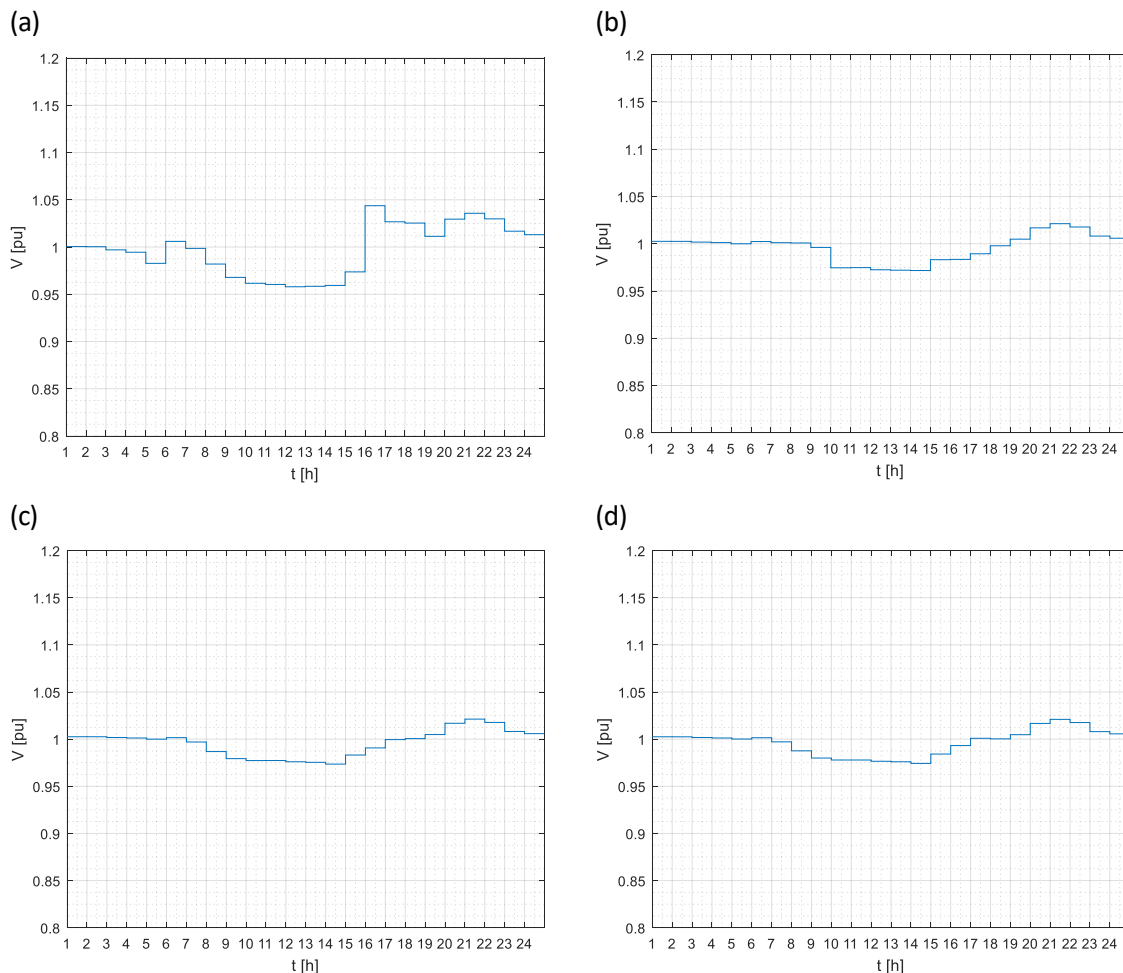


Figura 46. Busos que presenten el pitjor perfil de tensió amb un nivell mitjà de penetració aplicant cada un dels mètodes.

De la mateixa manera que s'ha pogut observar amb una alta penetració de renovables, amb l'aplicació del primer mètode (Figura 46.a) la tensió en els busos presenta igualment variacions de magnituds considerables. No obstant, aquestes es troben confinades dins un rang menor. En el gràfic s'observa com la tensió en el bus 64, aplicant el mètode 1, va d'aproximadament 0,94 pu a 1,04 pu. El salt observable a les 16 hores coincideix amb la càrrega completa del sistema d'emmagatzematge (Figura 45.a) i el conseqüent inici d'injecció de potència a la xarxa principal (Figura 44.a). De la mateixa manera que per a una penetració alta, totes quatre representacions corresponen al bus 64.

Amb l'aplicació del segon mètode (Figura 46.b) s'observa com la tensió es veu millorada respecte el mètode anterior. En contra del que passava per una alta penetració de renovables, la millora que

presenten en la tensió els mètodes 3 (Figura 46.c) i 4 (Figura 46.d) respecte el mètode 2 no són significatives tal i com es pot observar a la Taula 15.

Taula 15. Tensió màxima, mínima i mitjana amb un nivell mitjà de penetració de renovables.

Mètode	$V_{m\grave{a}x}[pu]$	$V_{m\grave{i}n}[pu]$	$V_{mitjana}[pu]$
1	1,0751	0,9579	1,0016
2	1,0351	0,9686	1,0001
3	1,0326	0,9686	1,0001
4	1,0307	0,9695	1,0001

6.3. Nivell baix de penetració de renovables

6.3.1. Generació

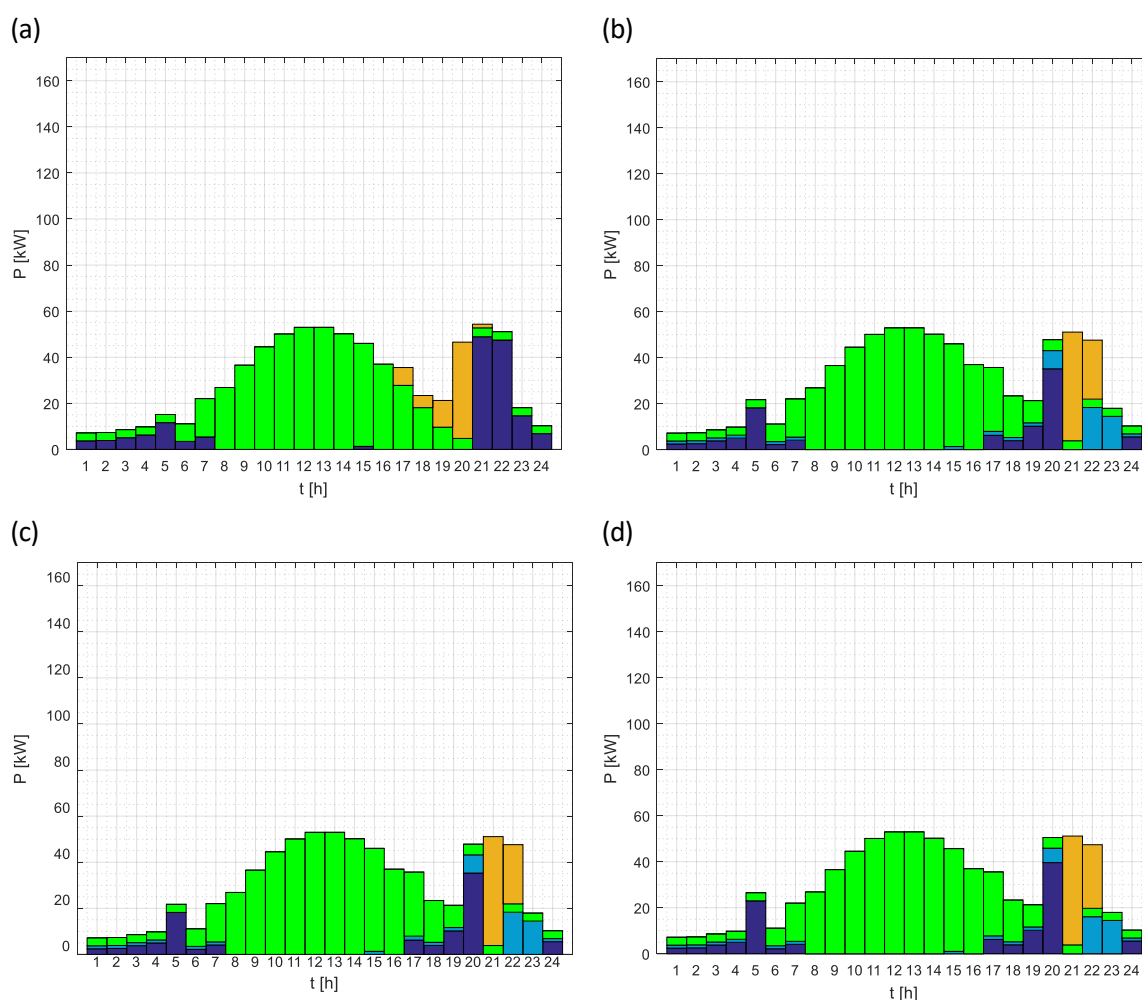


Figura 47. Generació amb un baix nivell de penetració aplicant cada un dels mètodes.

Per un baix nivell de penetració de renovables, sigui quin sigui el mètode aplicat, es pot apreciar (Figura 47) que la generació renovable (verd clar) no és suficient per satisfer la demanda i conseqüentment és necessari l'operació de la xarxa principal (blau fosc) en distints intervals al llarg del dia i no només al principi, tal i com passava per penetració alta (Figura 39) i mitja (Figura 43).

L'origen de la potència generada, en el mètode 2 (Figura 47.b), 3 (Figura 47.c) i 4 (Figura 47.d) és quasi idèntic i no presenten diferències tal com es pot observar en els corresponents gràfics. L'única diferència es troba a l'hora 5, on s'observa que la injecció de potència a la xarxa d'estudi procedent de la xarxa principal (blau fosc) pel mètode 4 és major que en el mètode 2 i 3.

La potència procedent del sistema d'emmagatzematge (ocre) no és utilitzada en els mateixos instants de temps en el mètode 1 (Figura 47.a) respecte als altres tres. Això es deu a què el primer mètode no presenta una optimització amb previsions futures a diferència del altres tres. Amb la presència de previsions en el model de gestió es possible establir la compra en els instants de menor preu.

Taula 16. $P_{g_{NR}}$ per un nivell baix de penetració de renovables.

Mètode	$P_{g_{NR}} [kW]$
1	158,77
2	154,88
3	155,02
4	159,78

Igual que en els altres nivell de penetració de renovables, la potència activa generada d'origen no renovable (generador dièsel més xarxa principal) és molt similar en tots quatre mètodes, Taula 16.

6.3.2. Despesa

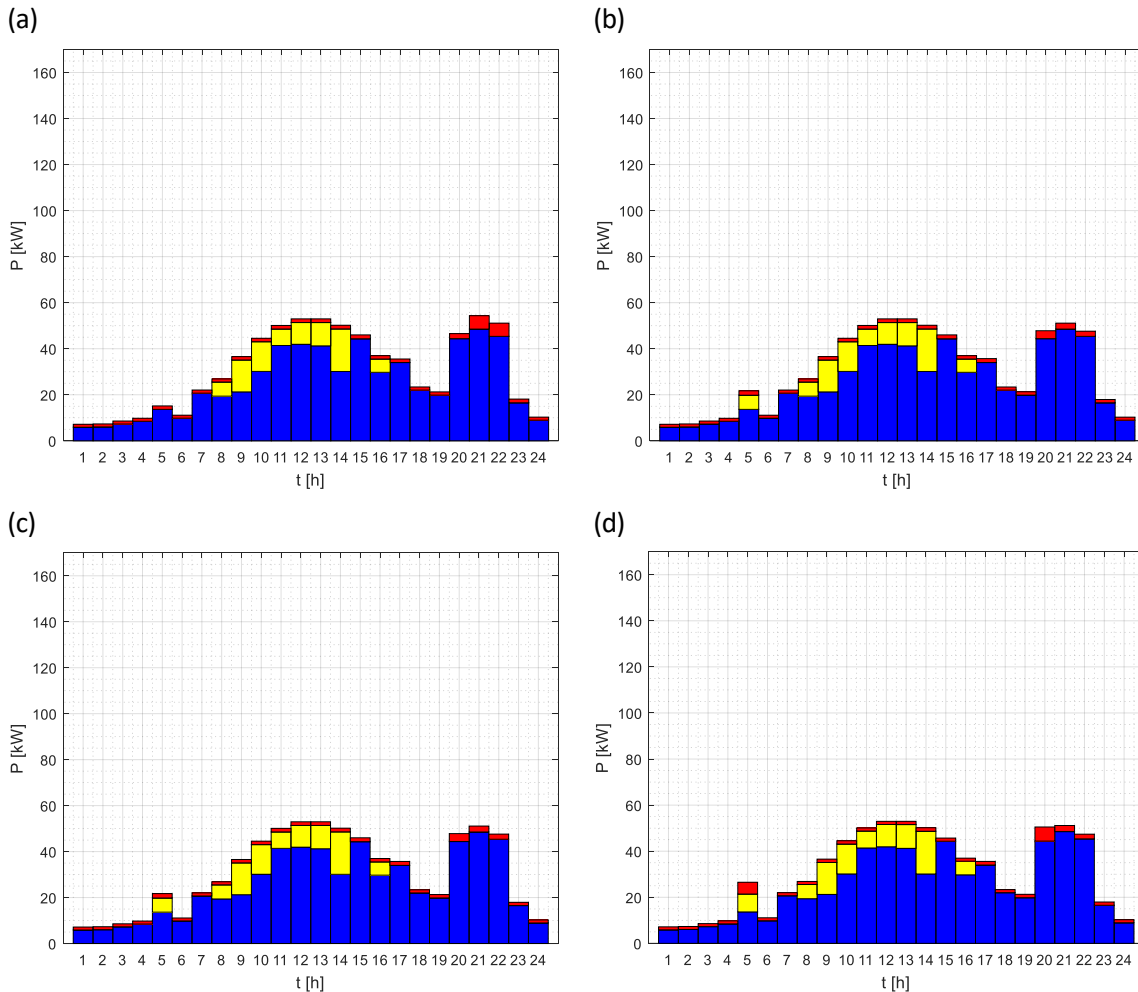


Figura 48. Despesa amb un nivell baix de penetració aplicant cada un dels mètodes.

En el mètode 2 (Figura 48.b), 3 (Figura 48.c) i 4 (Figura 48.d) s'observa que el sistema d'emmagatzematge és carregat (groc) amb potència procedent de la xarxa principal (blau fosc de Figura 47) per l'instant 5. Això és així perquè amb el model desenvolupat es té en compte el preu de l'energia a l'hora d'establir quan s'ha de comprar. Per tant, és més òptim comprar per emmagatzemar tot i tenir en compte el rendiment que presenta el sistema d'emmagatzematge.

El mètode 1 (Figura 48.a) presenta uns increments de pèrdues a l'instant 21 i 22, moment que es triplica respecte als altres instants del dia. En els gràfics s'observa que el perfil de pèrdues pel mètode 2 i 3 és molt similar. Amb l'aplicació del mètode 4 les pèrdues experimenten un pic a l'instant 5 i 20.

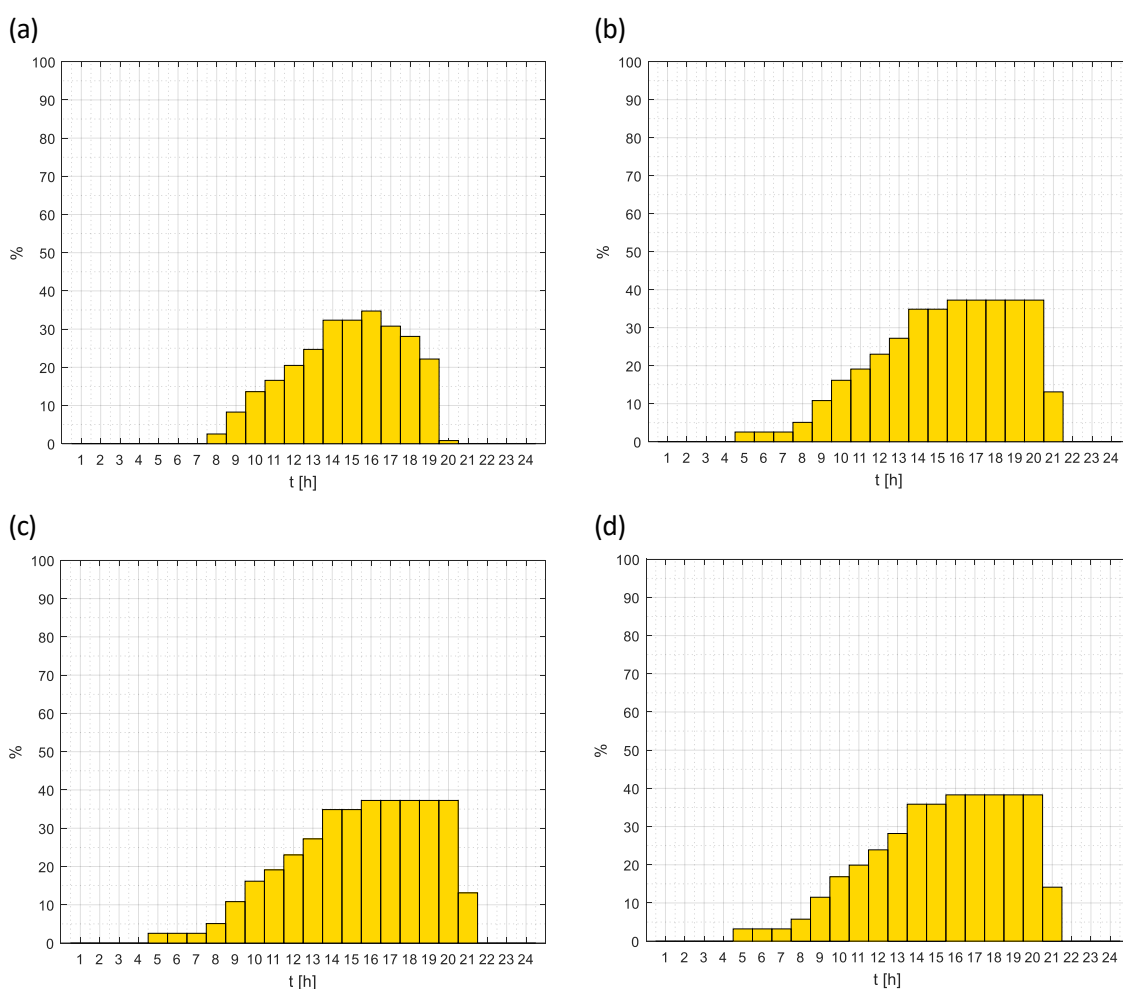
Els instants on hi ha pics de pèrdues coincideixen amb els instants que la potència procedent de la xarxa principal és màxima (Figura 47).

Taula 17. Pèrdues amb un nivell baix de penetració de renovables.

Mètode	Pèrdues globals [kW]
1	44,18
2	39,13
3	39,14
4	43,42

Els dos mètodes que presenten més pèrdues, igual que per un nivell alt (Taula 11) i mitjà (Taula 14) de penetració, són l'1 i el 4. No obstant, en aquest cas les pèrdues sí que van lligades a un lleuger augment de la generació de potència de font no renovable (Taula 17).

6.3.3. Estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge

**Figura 49.** SOC amb un nivell baix de penetració aplicant cada un dels mètodes.

En el mètode 1 (Figura 49.a) el sistema es descarrega esglaonadament a mesura que la potència renovable generada és insuficient per satisfer la demanda. Pel mètode 2 (Figura 49.b), 3 (Figura 49.c) i 4 (Figura 49.d) l'estat de càrrega presenta el mateix perfil i la descàrrega de la bateria és més abrupta.

Això es deu a què la descàrrega del sistema d'emmagatzematge es va produint a mesura que la generació renovable és insuficient per satisfer el consum. En canvi, pel mètode 2, 3 i 4 aquesta es troba condicionada pel preu de compra de l'energia.

6.3.4. Tensió

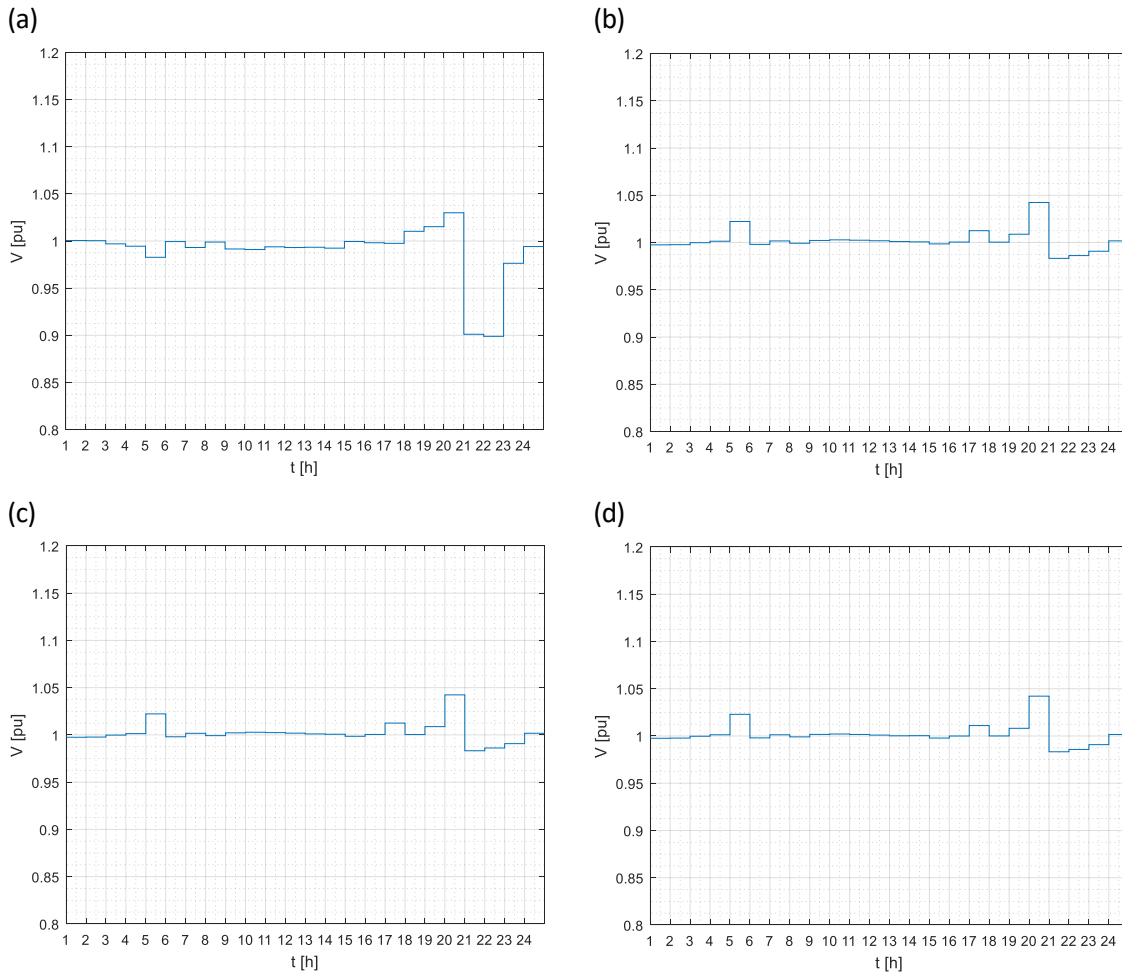


Figura 50. Busos que presenten el pitjor perfil de tensió amb un nivell baix de penetració aplicant cada un dels mètodes.

Les quatre representacions de la Figura 50 corresponen al bus 65 excepte la Figura 50.a que correspon al bus 64.

Aplicant el mètode 1 (Figura 50.a), es pot observar en el gràfic que el bus 64 experimenta una vall de tensió a les 21 i 22 hores. Aquest instant coincideix quan hi ha més pèrdues a la xarxa (Figura 48) i també quan la xarxa elèctrica principal subministra més potència (Figura 47).

El mínim de $V_{màx}$ el presenta el mètode 1. No obstant també presenta el mínim de $V_{mín}$ i el rang que presenta és (0,87 pu – 1,03 pu). Per contra, els altres mètodes presenten un màxim de tensió major

però un mínim de tensió major i en conjunt comporta una millora al veure disminuït el rang (0,97 pu – 1,05 pu).

Taula 18. Tensió máxima, mínima i mitjana amb un baix nivell de penetració de renovables.

Mètode	$V_{m\grave{a}x}[pu]$	$V_{m\grave{i}n}[pu]$	$V_{mitjana}[pu]$
1	1,0299	0,8709	0,9904
2	1,0544	0,9686	1,0000
3	1,0546	0,9686	1,0001
4	1,0525	0,9694	1,0000

7. Discussió dels resultats

En la següent taula es presenten els resultats més significatius obtinguts pels distints casos analitzats:

Taula 19. Resum dels resultats més significatius dels casos analitzats.

Niv. Pen.	Mètode	$V_{m\grave{a}x} [pu]$	$V_{m\grave{i}n} [pu]$	$V_{mitj} [pu]$	$Pg_{NR} [kW]$	$\sum P_{èrd} [kW]$	$Qg [kVAr]$
ALT	1	1,2008	0,9158	1,0142	30,63	100,16	171,06
	2	1,0653	0,9515	1,0002	37,22	64,56	166,59
	3	1,0329	0,9646	1,0001	30,57	60,03	166,28
	4	1,0312	0,9653	1,0001	30,57	92,87	168,48
MITJ	1	1,0751	0,9579	1,0016	30,63	53,90	165,94
	2	1,0351	0,9686	1,0001	34,53	50,78	165,63
	3	1,0326	0,9686	1,0001	30,57	50,05	165,58
	4	1,0307	0,9695	1,0001	30,57	70,87	166,91
BAIX	1	1,0299	0,8709	0,9904	158,77	44,18	166,05
	2	1,0544	0,9686	1,0000	154,88	39,13	164,98
	3	1,0546	0,9686	1,0000	155,02	39,14	164,98
	4	1,0525	0,9694	1,0000	159,78	43,42	165,31

Referent a la tensió, en tots els nivells de penetració de renovables s'ha observat que el mètode 1 presenta un rang de tensions més dispers. Per contra, el mètode 4 i el 3 presenten un rang més acotat i proper a 1 pu. D'entre ells el quatre és el que presenta el rang més acotat sempre tal i com es pot veure a la Figura 51.

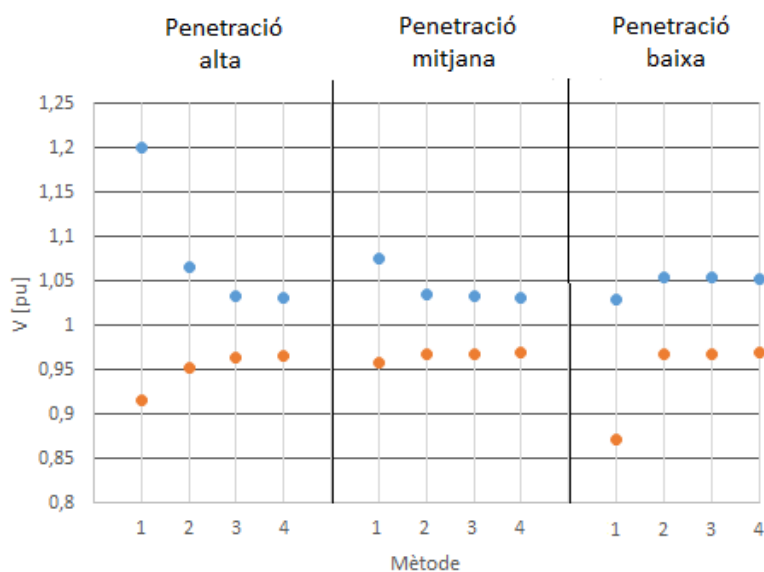


Figura 51. Representació de les tensions màximes i mínimes per cada cas de penetració de renovables utilitzant cada un dels mètodes.

Taula 20. V_{\max} [pu] – V_{\min} [pu].

Mètode	Niv. Pen. ALT	Niv. Pen. MITJ	Niv. Pen. BAIX
1	0,2850	0,1172	0,1590
2	0,1138	0,0665	0,0858
3	0,0683	0,0640	0,0860
4	0,0659	0,0612	0,0831

Gràcies a la Figura 51 i que en la Taula 19 els pitjors valors de tensió es troben destacats en vermell i els millors en verd, es pot apreciar a simple vista que el mètode 1 presenta els pitjors resultats (destacats en vermell) excepte en un únic valor, tensió màxima per penetració baixa.

Si bé en tots quatre mètodes és similar, per penetració alta i mitja de renovables la potència activa generada d'origen no renovable (xarxa més generador dièsel) és major pel mètode 2. No obstant, per penetració baixa, utilitzant el mètode 2 és la mínima. Tot i així, cal tenir en compte que en l'escenari de penetració baixa hi ha potència comprada i emmagatzemada per ser utilitzada en posterioritat. Per tant, en aquest cas no es veu una reducció de generació sinó una reducció del cost de compra.

Sigui quin sigui el mètode utilitzat, les pèrdues a la xarxa van lligades amb el nivell de penetració de renovables. És a dir, a major penetració, major són les pèrdues. En tots tres escenaris de penetració, les pèrdues són majors utilitzant els mètodes 1 i 4.

Referent a la generació de potència reactiva d'origen no renovable, tots quatre mètodes presenten valors molt similars en tots tres nivells de penetració de renovables. El rang de variació de reactiva generada és (164,98 – 171,06) kVAr. Les diferències de generació que presenten són poques i van lligades a les pèrdues. És a dir, com més grans són les pèrdues major és la potència reactiva generada a la xarxa.

Presentats els resultats, es pot descartar el mètode 1 a causa de l'allunyament dels valors de tensió respecte al valor nominal (1 pu). A més, aquest mètode pot comportar injecció de potència a la xarxa elèctrica principal en el cas que el sistema d'emmagatzematge no tinguí capacitat suficient per emmagatzemar l'energia sobrant, fet que en els altres tres mètodes no és possible.

El mètode 2 presenta millora respecte al mètode 1 en el rang de tensió. No obstant, la utilització d'aquest mètode comporta un augment en la generació de potència activa de font no renovable (xarxa principal més generació dièsel) per un nivell alt (6,6 kW) i mitjà de penetració (4 kW). És per això que es descarta la idoneïtat d'aquest mètode. Per tant, el mètode millor entre els presentats es troba en el 3 o 4.

Els mètodes 3 i 4 són els que presenten un rang de tensions més acotats. Entre ells dos, el 4 comporta una lleugera millora a partir de la tercera xifra decimal. Referent a la potència activa generada no renovable, ambdós mètodes presenten els nivells mínims de generació per penetració alta i mitja de renovables. No és així per baixa penetració tot i que, com ja s'ha comentat anteriorment, cal tenir en compte que a l'escenari de penetració baixa hi ha potència comprada i emmagatzemada per ser utilitzada en posterioritat i conseqüentment hi ha pèrdues en el transcurs d'aquesta operació. A més, cal dir que les pèrdues són superiors en el mètode 4 i no en el 3. Per penetració alta i mitja aquest fet no és de gaire preocupació ja que l'augment de pèrdues no va lligat a un augment de generació no renovable. No és així en el cas de baixa penetració, on l'augment de 4 kW de pèrdues està subministrat per l'augment de la generació no renovable.

Finalment es pot dir que el comportament de la xarxa utilitzant els mètodes 3 o 4 és molt similar. Si bé el mètode 4 presenta una lleugera millora en els nivells de tensió respecte al mètode 3, el fet de controlar potència activa i reactiva dels sistemes de generació distribuïda comporta un cost major de control que sembla no començar la millora en la tensió. No obstant, poder controlar la generació de reactiva dels sistemes de generació distribuïda podria possibilitar la desconexió de la xarxa d'estudi de la xarxa principal en aquells instants que la generació distribuïda sigui suficient per donar cobertura a la demanda energètica.

En conclusió, els mètodes 3 i 4 són els més idonis i la utilització d'un o l'altre anirà determinat segons el mode de funcionament que es desitgi.

8. Anàlisi de l'impacte ambiental

8.1. Emissions derivades del treball realitzat

Fruit de la realització d'aquest treball es calculen les emissions de CO₂ (52) derivades de les activitats bàsiques desenvolupades. Pel consum elèctric s'estableix una mitjana de potència de 15 W per hora treballada. En la següent taula es poden veure les emissions:

Taula 21. Emissions de CO₂ corresponents a les principals activitats desenvolupades.

Activitat	Quantitat	kg de CO ₂
Consum elèctric	10,8 kWh	3,5
Transport	420,0 km	11,7
TOTAL (kg de CO₂)		15,2

8.2. Contribució del treball en la reducció d'impacte ambiental derivat de la xarxa elèctrica

El present treball, "*Gestió dels recursos distribuïts a la xarxa de baixa tensió*", contribueix a la millora de la gestió de les energies renovables. Conseqüentment permet una reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle derivades de les fonts d'energia convencionals.

Una millor gestió de les energies renovables permetrà una reducció de la producció provinent de generadors convencionals utilitzant energies fòssils. A més a més, la integració de la generació distribuïda permet apropar la generació als punts de consum i conseqüentment les pèrdues derivades del transport es poden veure reduïdes. Si la generació es troba més propera a la demanda, les línies utilitzades pel transport d'energia es veuran reduïdes i l'impacte ambiental derivat d'aquestes també. En aquest sentit, contribueix a un dels objectius claus de la Unió Europea pel 2020: la reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle respecte l'any 1990 en un 20% de tal manera que el consum energètic estigui satisfet en un 20% per energies renovables i l'eficiència energètica augmenti un 20%.

Conclusions

Amb la realització del present treball, s'ha pogut comprovar la importància d'una bona gestió dels recursos distribuïts i les diferències en el comportament de la xarxa aplicant un model de gestió o altre. Vegent els resultats, el model desenvolupat comporta una millora en els paràmetres de la xarxa.

També s'ha pogut comprovar que un model pot estar ben construït matemàticament però a l'hora d'aplicar-ho mitjançant un programa informàtic no es pugui resoldre a causa de l'extensió o característiques de les equacions utilitzades. En aquest sentit, s'ha vist la importància de que el model matemàtic s'ajusti a les característiques, restriccions i necessitats que presenta el programa utilitzat per a la seva aplicació.

En vista dels resultats, tal vegada s'hauria de revisar la capacitat del sistema d'emmagatzematge i realitzar un dimensionat millor. No obstant, com la finalitat d'aquest treball no era el de dimensionar el sistema d'emmagatzematge, el criteri seguit és suficient per veure el comportament d'una xarxa de distribució amb recursos distribuïts.

Es pot concloure que el model matemàtic desenvolupat presenta millores en la gestió del recursos distribuïts a la xarxa de distribució. Tot i així, com a millora futura es proposa complementar el model matemàtic desenvolupat amb la incorporació de càrregues desplaçables al llarg del temps. És a dir, que es permeti una gestió de càrregues directa.

Pressupost

En aquest apartat es presenten els costos derivats del treball realitzat. Es té en compte el cost derivat del material utilitzat així com també el cost d'enginyeria.

Cost material

Taula 22. Pressupost del cost material.

Concepte	Cost (€)	Unitats	Total (€)
Llicència <i>Matlab Education</i>	500,00	1	500,00
Llicència <i>Office 365 Empresa Premium</i>	63,50	1	63,50
Consum elèctric (kWh)	0,13347	10,8	1,44
Impressió del treball	40,00	1	40,00
Transport	105,00	1	105,00
TOTAL			709,94

Un total de set-cents nou euros amb noranta-quatre cèntims

Cost d'enginyeria

Taula 23. Pressupost del cost d'enginyeria.

Concepte	Cost (€/h)	Hores (h)	Cost total (€)
Adquisició dels coneixements del software utilitzat	25	84	2100
Investigació	25	120	3000
Realització del model desenvolupat	25	280	7000
Aplicació del model al cas d'estudi	25	62	1550
Redacció del projecte	25	126	3150
TOTAL		672	16800

Un total de setze mil vuit-cents euros

Cost total

Taula 24. Pressupost del cost total.

Concepte	Cost (€)
Cost material	709,94
Cost d'enginyeria	16800,00
SUBTOTAL	17509,94
IVA (21%)	3677,09
TOTAL	21187,03

Un total de vint-i-un mil cent vuitanta-set euros amb tres cèntims



Bibliografia

1. Bennasar Romero, M.J. *Análisis técnico de una red de distribución con penetración de energías renovables y baterías*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
2. Endesa. La red eléctrica. A: [en línia]. 2014. [Consulta: 14 març 2017]. Disponible a: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/el-transporte-de-electricidad/xv.-la-red-electrica.
3. Ruiz, J.R. Transmissió aèria d'energia elèctrica en corrent continu a molt alta tensió (HVDC , High Voltage Direct Current). 2006, Vol. 4, núm. 1.
4. Villafila, R.. A: *Sistemes Elèctrics de Potència*. Barcelona: 2016.
5. Ministerio de Ciencia y Tecnología. *Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*. 2002. Madrid: Boletín Oficial del Estado.
6. Sánchez Díaz, Á. i Sorribes Colell, E. *Xarxes de distribució en baixa tensió* [en línia]. Instal·lacions de distribució, Disponible a: http://ioc.xtec.cat/materials/FP/Materials/0801_IEA/IEA_0801_M03/web/html/media/fp_iea_m03_u2_pdfindex.pdf.
7. Sistemas de distribución. A: [en línia]. [Consulta: 14 febrer 2017]. Disponible a: https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-23_12-52-48110589.pdf.
8. Ackermann, T., Andersson, G. i Söder, L. Distributed generation: A definition. A: *Electric Power Systems Research*. 2001, Vol. 57, núm. 3, p. 195-204. ISSN 03787796. DOI 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
9. Olivares, D.E., Canizares, C.A. i Kazerani, M. A Centralized Optimal Energy Management System for Microgrids. A: *IEEE*. 2011, Vol. 6, núm. 6, p. 2681-2693. ISSN 19493053. DOI 10.1109/TSG.2015.2469631.
10. Segura Heras, I. *EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA*. Universitat Politècnica de València, 2005.
11. Grupo Tecma Red S.L. Generación distribuida. A: [en línia]. [Consulta: 15 abril 2017]. Disponible a: <https://www.smartgridsinfo.es/generacion-distribuida>.
12. Chiradeja, P. i Ramakumar, R. An approach to quantify the technical benefits of distributed generation. A: *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2004, Vol. 19, núm. 4, p. 764-773. ISSN 08858969. DOI 10.1109/TEC.2004.827704.
13. Del Almo Martínez, L. Generación energética distribuida. A: Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, ed., *Jornadas de Eficiencia Energética en la Distribución de la Energía Eléctrica* [en línia]. Disponible a: http://www.cerien.upc.edu/jornades/jeedee2007/ponencies/07-05-29_Generacion_energetica_distribuida.pdf.

14. Valencia Quintero, J.P. GENERACIÓN DISTRIBUIDA: Democratización de la energía eléctrica. A: *Criterio Libre* [en línea]. 2008, Vol. 8, p. 105-112. Disponible a: <http://www.unilibre.edu.co/CriterioLibre/images/revistas/8/CriterioLibre8art07.pdf>.
15. Brown, R.E. i Freeman, L.A.A. Analyzing the reliability impact of distributed generation. A: *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*. 2001, Vol. 2, núm. SUMMER, p. 1013-1018. ISSN 21608563. DOI 10.1109/PESS.2001.970197.
16. Observatorio Industrial del sector de la Electrónica Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones. *SMART GRIDS Y LA EVOLUCIÓN DE LA RED ELÉCTRICA* [en línea]. 2011. Disponible a: http://www.minetad.gob.es/industria/observatorios/SectorElectronica/Actividades/2010/Federación de Entidades de Innovación y Tecnología/SMART_GRIDS_Y_EVOLUCION_DE_LA_RED_ELECTRICA.pdf.
17. Villafáfila, R.. A: *Xarxes elèctriques intel·ligents*. Barcelona: 2016.
18. Barker, P.P. i De Mello, R.W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems. A: *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*. 2000, Vol. 3, núm. c, p. 1645-1656 vol. 3. DOI 10.1109/PESS.2000.868775.
19. Deutche Bank. Deutsche Bank's 2015 solar outlook: accelerating investment and cost competitiveness. A: [en línea]. 2015. [Consulta: 10 maig 2017]. Disponible a: <https://www.db.com/cr/en/concrete-deutsche-banks-2015-solar-outlook.htm>.
20. Red Eléctrica de España. Equilibrio constante entre generación y demanda. A: [en línea]. [Consulta: 28 febrer 2017]. Disponible a: <http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico>.
21. Meyer, B. et al. Impact of large share or renewable generation on investment costs at the example of Aüw distribution network. A: . Estocolm: 22nd International Conference on Electricity Distribution, 2013.
22. Endesa. Smart Grids. A: [en línea]. [Consulta: 1 maig 2017]. Disponible a: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/smart-grid.
23. Red Eléctrica de España. Características de las redes inteligentes. A: [en línea]. [Consulta: 1 febrer 2017]. Disponible a: <http://www.ree.es/es/red21/redes-inteligentes/que-son-las-smartgrid>.
24. Bordons, C., García-Torees, F. i Valverde, L. Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. A: . 2015, Vol. 12, p. 117-132. DOI 10.1016/j.riai.2015.03.001.
25. Grupo Tecma Red S.L. Microrredes. A: [en línea]. [Consulta: 12 febrer 2017]. Disponible a: <https://www.smartgridsinfo.es/microrredes>.
26. Viñals Canal, G., Aragüés Peñalba, M. i Gomis Bellmunt, O. Gestión eficiente de una microred. A: [en línea]. II Congrés Smarts Grids, 2014, Disponible a: <https://www.smartgridsinfo.es/comunicaciones/ii-congreso-sg-gestion-eficiente-de-una-microred>.
27. Asociación Española para la Calidad. Gestión de la energía. A: [en línea]. [Consulta: 28 gener 2017]. Disponible a: <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/gestion-de-la-energia>.

28. Red Eléctrica de España. Integración segura de energías renovables. A: [en línia]. 2017, Disponible a: <http://www.ree.es/es/publicaciones/actividades-de-ree/centro-de-control-de-energias-renovables>.
29. Leemput, N. et al. MV and LV residential grid impact of combined slow and fast charging of electric vehicles. A: *Energies*. 2015, Vol. 8, núm. 3, p. 1760-1783. ISSN 19961073. DOI 10.3390/en8031760.
30. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. Plan de energías renovables 2011-2020. A: [en línia]. 2011, [Consulta: 1 gener 2017]. Disponible a: <http://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/plan-de-energias-renovables-2011-2020>.
31. Mohsenian-Rad, A.-H. et al. Autonomous Demand Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid. A: *Ieee Transactions on Smart Grid* [en línia]. 2010, Vol. 1, núm. 3, p. 320-331. ISSN 19493053. DOI 10.1109/TSG.2010.2089069. Disponible a: <http://www.ee.ucr.edu/~hamed/MRWJSLGjTSG10.pdf>.
32. Mohsenian-Rad, A.-H. i Leon-garcia, A. Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity. A: *IEEE Transactions on Smart Grid* [en línia]. 2010, Vol. 1, núm. 2, p. 120-133. ISSN 19493053. DOI 10.1109/TSG.2010.2055903. Disponible a: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5540263>.
33. Minchala-Avila, L.I. et al. A review of optimal control techniques applied to the energy management and control of microgrids. A: *Procedia Computer Science*. 2015, Vol. 52, núm. 1, p. 780-787. ISSN 18770509. DOI 10.1016/j.procs.2015.05.133.
34. Institut d'Estudis Catalans. Model. A: *Diccionari de l'IEC* [en línia]. 2017. Disponible a: <http://dlc.iec.cat/results.asp?txtEntrada=model&operEntrada=0>.
35. Williams, H.P. *Model Building in Mathematical Programming*. 2013. Loondres: 2013. ISBN 9781118443330.
36. Ramos, A. et al. *Modelados matemáticos de optimización* [en línia]. 2010. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2010. Disponible a: https://www.gams.com/fileadmin/community/contrib/doc/modelado_en_gams.pdf.
37. Di Piazza, M.C. et al. A novel EMS for residential microgrids reconciling end-user and utility needs. A: *5th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2015*. 2015, p. 140-146. DOI 10.1109/ICCEP.2015.7177614.
38. Li, K. i Tseng, K.J. Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in micro-grid. A: *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2016, p. 5235-5240. DOI 10.1109/IECON.2015.7392923.
39. Mesas, J.J. Estudio de flujo de cargas. A: *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. Barcelona: 2016.
40. OMIE. Preu de l'energia. A: [en línia]. Disponible a: <http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>.
41. N. Pflugradt. *LoadProfileGenerator* [en línia]. Alemanya: 2016. Disponible a: <http://www.loadprofilegenerator.de>.

42. Nohana 3000. *Catálogo de Productor Eólica* [en línia]. Disponible a: <http://www.nohana3000.com/wp-content/uploads/110823-Catalogo-Español-Eolica.pdf>.
43. Hingorani, N.G. i Gyugyi, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems* [en línia]. 2000. ISBN 9780780334557. DOI 10.1109/9780470546802. Disponible a: <http://books.google.co.jp/books?id=2-ceAQAAIAAJ>.
44. Joint Reseach Center. *PVGIS* [en línia]. [Consulta: 14 febrer 2017]. Disponible a: <http://photovoltaic-software.com/pvgis.php>.
45. Acció pel clima de la Unió Europea. Objetivos clave de la UE para 2020. A: [en línia]. 2017. [Consulta: 15 març 2017]. Disponible a: https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu_es.
46. *julia* [en línia]. Disponible a: <https://julialang.org/downloads/>.
47. *Jump* [en línia]. Disponible a: <https://jump.readthedocs.io/en/latest/installation.html>.
48. *Atom* [en línia]. Disponible a: <https://atom.io>.
49. *Cbc* [en línia]. Disponible a: <https://github.com/JuliaOpt/Cbc.jl>.
50. *Ipopt* [en línia]. Disponible a: <https://github.com/JuliaOpt/Ipopt.jl>.
51. Ferrer Alayeto, D. *Circuito para la medición de la carga y la salud de baterías*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
52. Estrategia aragonesa de cambio climático y energías limpias. *Calculadora de emisiones de CO2* [en línia]. Disponible a: <http://calcarbono.servicios4.aragon.es/>.
53. González, J.A. *Sistemas por unidad* [en línia]. Universidad Nacional de Tucuman, 2015. Disponible a: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/sep/wp-content/uploads/sites/20/2015/03/SEP-Sistemas-por-Unidad.pdf>.
54. Sancho Ávila, J.M. et al. *Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT* [en línia]. 2012. AEMET, 2012. Disponible a: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf.
55. De La Hoz Casas, J. *Guía de diseño de centrales eléctricass. Aplicación a las instalaciones fotovoltaicas*. Barcelona.

Annex A

A1. Sistema per unitat (pu)

En l'anàlisi dels sistemes de potència i en general en el camp de l'enginyeria elèctrica, és molt comú expressar els valors en valors relatius ja sigui en percentatges (%) o en valors per unitat (pu).

El valor relatiu en pu es troba com (53):

$$valor[pu] = \frac{valor[unitat]}{valor\ base\ [unitat]} \quad (\text{Eq. 39})$$

Els valors de potència aparent base (S_{base}) i tensió base (V_{base}) són valors que es determinen en funció del sistema de potència a analitzar. Un cop decidit ambdós, les bases dels altres paràmetres estan determinades com:

Impedància base:

$$Z_{base}[pu] = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (\text{Eq. 40})$$

Admitància base:

$$Y_{base}[pu] = \frac{1}{S_{base}} = \frac{S_{base}}{V_{base}^2} \quad (\text{Eq. 41})$$

Aquesta forma d'expressar els valors atorga certs avantatges. Entre els principals es troba la proporció d'informació de magnitud relativa i que el circuit equivalent d'un transformador es pot veure simplificat. A més, permet la detecció d'errors de forma més fàcil.

A2. Matriu d'admitància de bus

En xarxes sense acoblament magnètic entre els seus components, la matriu d'admitància de bus (Y_{bus}) es calcula de la següent manera segons la posició dels elements de la matriu (39):

- Elements de la diagonal:

$$Y_{ii}[pu] = \sum \text{admitàncies connectades al bus "i"} \quad (\text{Eq. 42})$$

- Elements restants:

$$Y_{ij} = - \sum \text{admitàncies de línia connectades entre els busos "i" i "j"} \quad (\text{Eq. 43})$$

Annex B

B1. Elecció de la potència nominal de les plaques fotovoltaïques

La magnitud de la potència de les plaques fotovoltaïques instal·lades a cada un dels habitatges és en funció de l'ocupació de la casa. El criteri que s'ha seguit per a l'elecció de la potència fotovoltaïca instal·lada es presenta tot seguit. Cal esmentar que hi ha mètodes més precisos per dimensionar el sistema. No obstant, com l'objectiu d'aquest treball no és el dimensionat, es considera suficient l'emprat ja que allò que s'utilitza en el treball és tan sols el perfil de generació que se'n deriva.

Primerament s'ha calculat l'energia consumida per cada habitatge al llarg del dia a partir de les dades facilitades de cada minut pel programa *LoadProfileGenerator* de la corba de potència activa.

Dividint el valor de potència [W] que es té de cada minut entre 60 s'obté l'energia consumida [Wh] cada minut:

$$E_{minut}[Wh] = P_{minut}[W]/60 \quad (\text{Eq. 44})$$

Fent la suma de tota l'energia consumida cada minut s'obté el consum energètic al llarg del dia:

$$E_{dia}[Wh] = \sum_{t=1}^{1440} E_{minut}[Wh] \quad (\text{Eq. 45})$$

A partir del valor del consum energètic diari, la irradiació solar mitjana anual i el rendiment, s'obté la superfície necessària per poder satisfer la demanda a partir de la generació fotovoltaïca:

$$Superfície[m^2] = \frac{E_{dia}[Wh/dia]}{I_{mitjaAnual}[Wh/m^2/dia] \cdot rend} \quad (\text{Eq. 46})$$

La potència fotovoltaïca a instal·lar serà:

$$PV[W] = Superfície[m^2] \cdot H_{STC}[W/m^2] \cdot rend \quad (\text{Eq. 47})$$

Un cop s'obté el valor de la potència fotovoltaïca a instal·lar i havent arrodonit el resultat obtingut, es pot calcular la superfície instal·lada finalment:

$$Superfície_{final}[m^2] = \frac{PV_{final}[W]}{rend \cdot H_{STC}[W/m^2]} \quad (\text{Eq. 48})$$

Seguint el mètode descrit, s'ha calculat la potència fotovoltaica instal·lada per cada un dels perfils d'ocupació dels habitatges. En el càlcul, el valor escollit d'irradiància solar mitja anual es correspon amb el valor de Barcelona, 3 kWh/m²/dia, facilitat per (54). El rendiment aplicat és el producte del rendiment del panell (18%) i el rendiment del sistema (70%) considerats.

La potència fotovoltaica màxima que pot produir cada generador fotovoltaic connectat és en funció de la potència instal·lada i la radiació incident:

$$P_{g_{PV}}[W] = Superfície[m^2] \cdot H[W/m^2] \cdot rend \quad (Eq. 49)$$

En el full de càlcul (*Excel*) es pot elegir entre distints escenaris de radiació. Les dades de radiació utilitzades han estat obtingudes mitjançant el programari en línia *PVGIS* (44). Si bé les dades facilitades corresponen a intervals de 15 minuts, com l'estudi generat s'ha realitzat per intervals d'una hora, s'han escollit com a dades de radiació les mitjanes corresponents de cada hora.

Per a latitud del sud d'Europa és freqüent sobredimensionar la potència fotovoltaica respecte la potència de l'inversor de tal manera que el factor de dimensionat es trobi entre 0,85 i 1. El factor de dimensionat és la relació entre la potència nominal de l'inversor i la potència pic del generador fotovoltaic (55).

Si bé es cert que la placa fotovoltaica tan sols és capaç de generar potència activa, el convertidor utilitzat per a la connexió dels mòduls fotovoltaics (corrent continu) amb la xarxa elèctrica (corrent altern) permet regular tant la potència activa com la reactiva que es desitja generar (43). La potència aparent del convertidor s'estableix del mateix valor que la potència fotovoltaica instal·lada.

Annex C

C1. Pèrdues per un nivell alt de penetració de renovables

Els següents gràfics són una ampliació de les pèrdues que presenta la xarxa per un nivell alt de penetració de renovables.

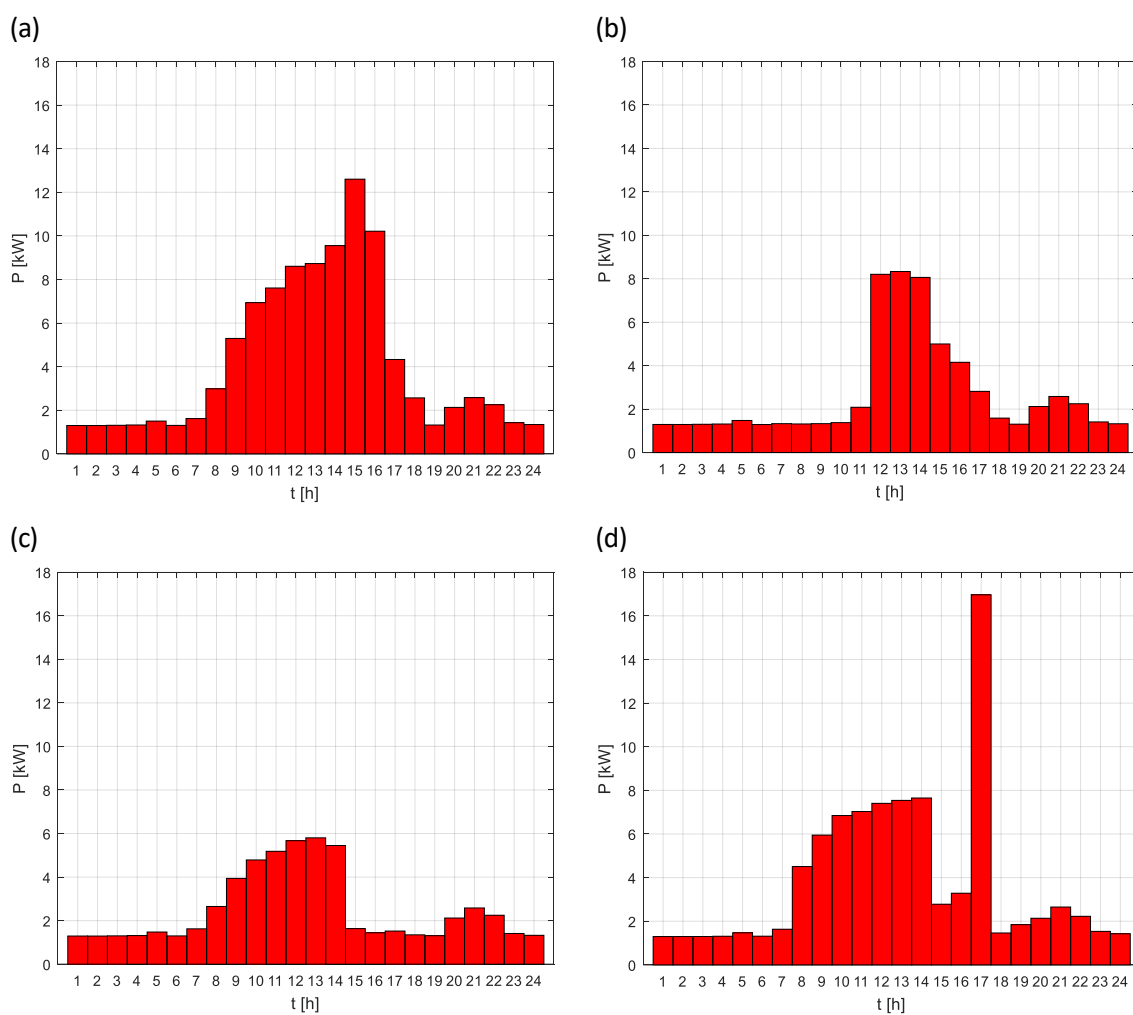


Figura 52. Pèrdues per un alt nivell de penetració de renovables aplicant cada mètode.

C2. Pèrdues per un nivell mitjà de penetració de renovables

Els següents gràfics són una ampliació de les pèrdues que presenta la xarxa per un nivell mitjà de penetració de renovables.

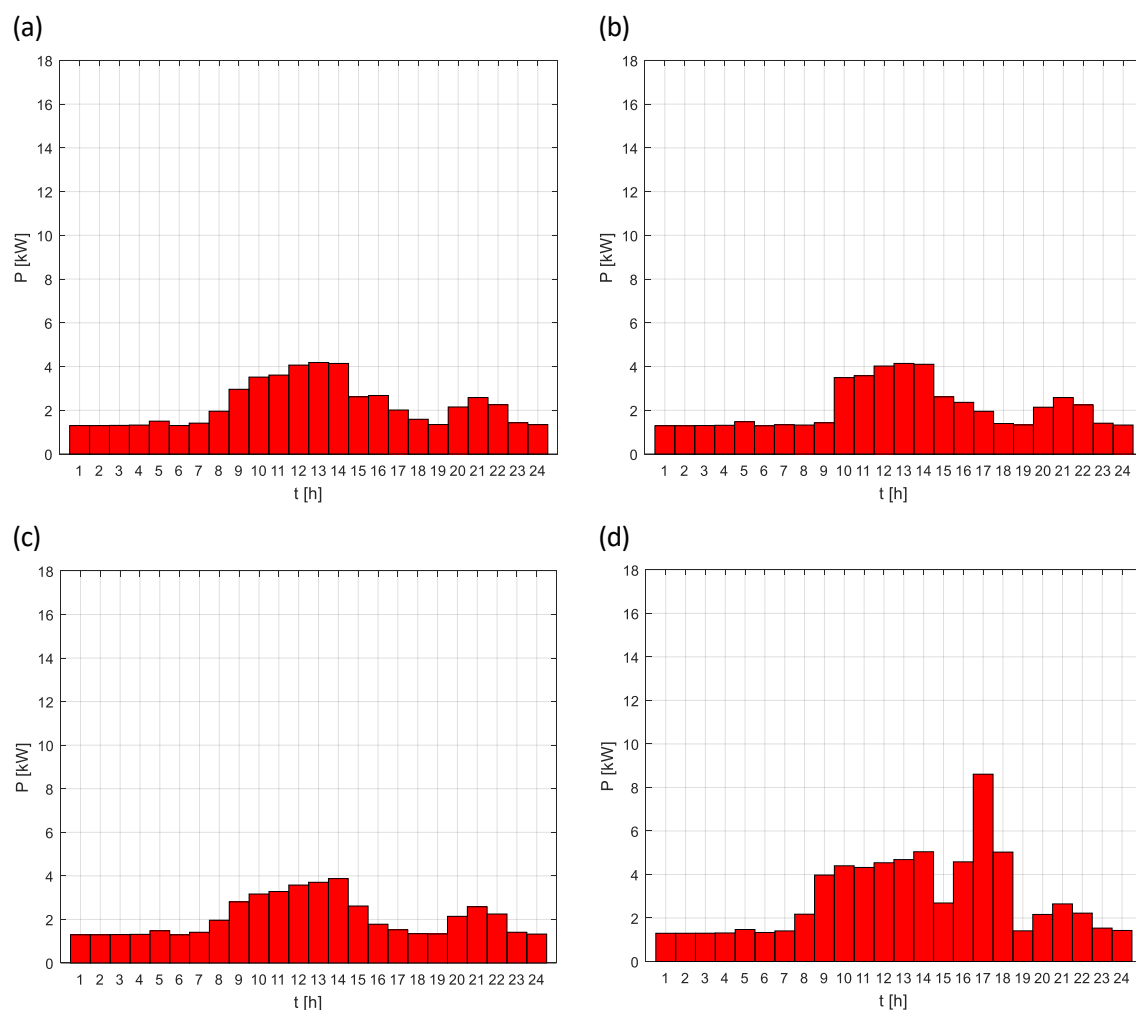


Figura 53. Pèrdues per un nivell mitjà de penetració de renovables aplicant cada mètode.

C3. Pèrdues per un nivell baix de penetració de renovables

Els següents gràfics són una ampliació de les pèrdues que presenta la xarxa per un nivell baix de penetració de renovables.

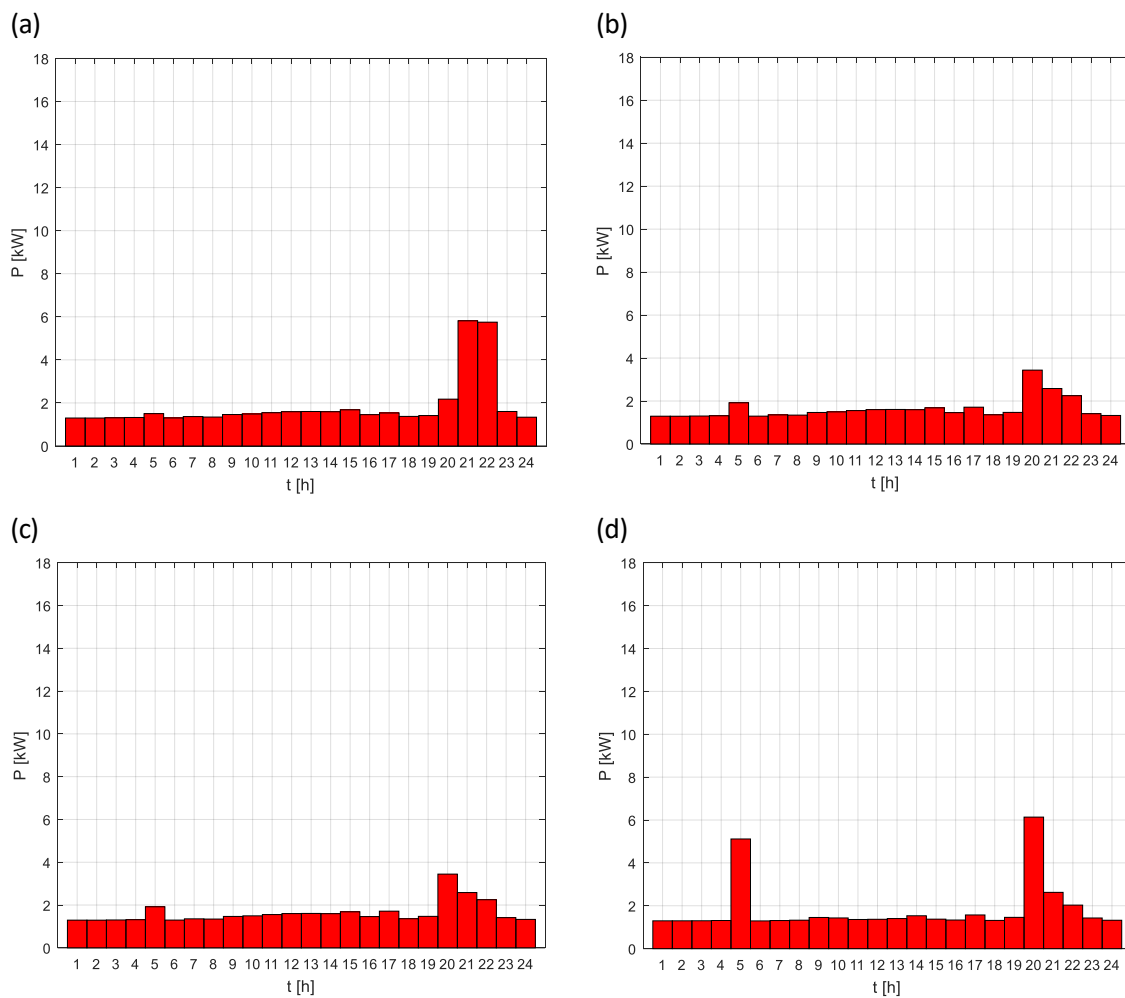


Figura 54. Pèrdues per un baix nivell de penetració de renovables aplicant cada mètode.



Annex D

D1. Funcionament bàsic dels Excels utilitzats

Els càlculs realitzats relatius a la configuració de la xarxa s'han automatitzat amb la intenció que es pugui canviar les dades sense la necessitat d'haver de tornar a refer els càlculs.

El tipus d'habitatge corresponent a cada bus de la xarxa es pot modificar a l'Excel "Perfils" al full "Distribució de cases". Això és possible fer-ho modificant el número assignat a la columna "Tipus" d'acord amb la llegenda (Figura 22).

CASA	Tipus
1	2
2	5
3	7
4	9
5	6

Figura 55. Fragment de la taula d'elecció del tipus d'habitatge assignat a cada bus de la xarxa.

L'escenari de radiació i de vent també es pot modificar, mitjançant una casella desplegable al full "Radiació dades" i "Vent dades", respectivament. Segons l'escenari elegit s'utilitzen unes dades o altres de les disponibles:

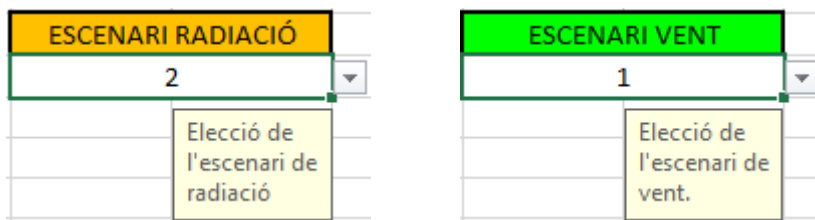


Figura 56. Pestanyes per l'elecció de l'escenari de radiació i vent desitjats

De la mateixa manera també és possible seleccionar la penetració de renovables:

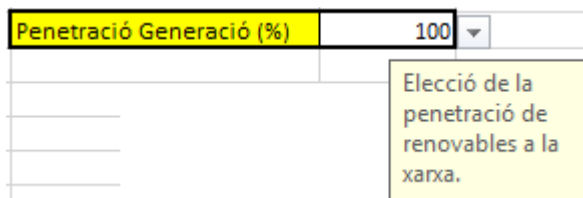


Figura 57. Pestanya desplegable per l'elecció de penetració de renovables.

Les dades corresponents als paràmetres de les línies i el transformador es troben a un fitxer de càlcul. Aquest és una modificació d'un dels fitxers utilitzats a (1). A partir de la impedància del cablejat, Z (Ω/km), i de les distàncies entre nusos, s'obtenen les impedàncies necessàries per al càlcul de la matriu d'admitàncies Y_{bus} . La construcció d'aquesta està automatitzada amb la finalitat que si la configuració de la xarxa es vegés modificada, la matriu seria construïda sense la necessitat de realitzar canvis.

Annex E

E1. Fitxer *Matlab* per la preparació de dades per a aplicar el model agregat predictiu al cas d'estudi

Tot seguit es presenta el codi realitzat amb *Matlab* per a preparar les dades a utilitzar pel fitxer *Julia* del model agregat predictiu:

```
clear all
close all
clc
%introducció de dades
NumeroNusos=65;
Penetracio=xlsread('Perfils','Penetració generació','C18');
temps=24;
rendPV=xlsread('Perfils','Panells','C50');
Escenari_radiacio=xlsread('Perfils','Radiació dades','B6');
Escenari_vent=xlsread('Perfils','Vent dades','B6');
BusTrafo=63;
Sbase=xlsread('Branch_4','Modificar aquí','B5')*1000000;
Vbase=xlsread('Branch_4','Modificar aquí','B4')*1000;
Zbase=Vbase^2/Sbase;
%CONSTRUCCIÓ MATRIU Pgmax i Qgmax
VectorPenetracioDades=xlsread('Perfils','Penetració generació','L4:L15');
Tipus_habitatge=xlsread('Perfils','Distribució cases','D3:D64');
%construcció vector de penetracio d'acord amb configuracio
for i=1:length(Tipus_habitatge)
    VectorPenetracio(i)=0;
    for j=1:length(VectorPenetracioDades)
        if Tipus_habitatge(i)==j
            VectorPenetracio(i)=VectorPenetracioDades(j);
        end
    end
end
VectorSuperficieDades=xlsread('Perfils','Penetració generació','R4:R15');
%construcció vector cases totals de cada tipus amb renovables
%instal·lades
for i=1:length(VectorPenetracioDades)
    N_cases(i)=0;
    for j=1:length(Tipus_habitatge)
        if i==Tipus_habitatge(j)
            if Penetracio>=VectorPenetracioDades(i)
                N_cases(i)=N_cases(i)+1;
            end
        end
    end
end
%construcció vector superficie d'acord amb configuracio
for i=1:length(Tipus_habitatge)
    VectorSuperficie(i)=0;
    for j=1:length(VectorSuperficieDades)
        if Tipus_habitatge(i)==j
            VectorSuperficie(i)=VectorSuperficieDades(j);
        end
    end
end
for i=length(VectorSuperficie)+1:NumeroNusos
    VectorSuperficie(i)=-1;
end
DadesRadiacio1=xlsread('Perfils','Radiació dades','H6:H101');
DadesRadiacio2=xlsread('Perfils','Radiació dades','M6:M101');
DadesRadiacio3=xlsread('Perfils','Radiació dades','R6:R101');
DadesPaerogenerador1=xlsread('Perfils','Vent dades','I6:I101');
DadesPaerogenerador2=xlsread('Perfils','Vent dades','Y6:Y101');
DadesPaerogenerador3=xlsread('Perfils','Vent dades','AG6:AG101');
%escenari radiació correcte?
validacioPV=1;
if Escenari_radiacio==1
    escRad=DadesRadiacio1;
```

```

else
    if Escenari_radiacio==2
        escRad=DadesRadiacio2;
    else
        if Escenari_radiacio==3
            escRad=DadesRadiacio3;
        else
            disp('Escenari radiació incorrecte')
            validacio=0;
        end
    end
end
end
%escenari vent correcte?
validacioW=1;
if Escenari_vent==1
    escA=DadesPaerogenerador1;
else
    if Escenari_vent==2
        escA=DadesPaerogenerador2;
    else
        if Escenari_vent==3
            escA=DadesPaerogenerador3;
        else
            disp('Escenari vent incorrecte')
            validacioW=0;
        end
    end
end
end
%mitjana de les dades de radiacio i Paerogenerador
for ins=1:temps
    b=ins-1;
    Radiacio(ins)=0;
    Paerogenerador(ins)=0;
    for cont=1:4
        Radiacio(ins)=Radiacio(ins)+escRad(b*4+cont);
        Paerogenerador(ins)=Paerogenerador(ins)+escA(b*4+cont);
    end
end
Radiacio=Radiacio/4;
Paerogenerador=Paerogenerador/4;
if validacioPV==1 && validacioW==1
    %vector binari segons si al bus hi ha generador operant
    for i=1:length(VectorPenetracio)
        GeneradorConnectat(i)=0;
        if VectorPenetracio(i)<=Penetracio
            GeneradorConnectat(i)=1;
        end
    end
    %potència (renovables) nominal instal·lada total
    PN_PV=xlswread('Perfiles','Penetració generació','G4:G15')*1000;
    PN_W=xlswread('Perfiles','Penetració generació','I4:I15')*1000;
    Renv_inst=0;
    for i=1:length(VectorPenetracioDades)
        if VectorPenetracioDades[i]<=Penetracio
            Renv_inst=Renv_inst+N_cases(i)*PN_PV(i)+N_cases(i)*PN_W(i);
        end
    end
end
%construcció vector de Pgmax per les plaques
for i=1:NumeroNusos
    for t=1:temps
        Pgmax_PV(i,t)=0;
        if VectorSuperficie(i)>0
            Pgmax_PV(i,t)=Radiacio(t)*VectorSuperficie(i)*GeneradorConnectat(i)*rendPV;
        end
    end
end
%construcció vector de Pgmax per aerogeneradors
for i=1:NumeroNusos
    for t=1:temps
        Pgmax_W(i,t)=0;
        if VectorSuperficie(i)==0

```



```

        Pgmax_W(i,t)=Paerogenerador(t)*GeneradorConnectat(i);
    end
end
end
Pgmax=Pgmax_FV+Pgmax_W;
%vector PgmaxTotal(suma de les potències dels diferents generadors)
for t=1:temps
    aux=0;
    for i=1:NumeroNusos
        aux=aux+Pgmax(i,t)
    end
    PgmaxTotal(t)=aux;
end
PgmaxTotal=PgmaxTotal/Sbase;%pas a pu
dlmwrite('PgmaxTotal.txt', PgmaxTotal, ' ')
end
%CONSTRUCCIÓ MATRIU Pd i Qd
Dades_Tipus_Pd=xlsread('Perfiles','Perfil Consum','C2:BCL13');
Dades_Tipus_Qd=xlsread('Perfiles','Perfil Consum','C17:BCL28');
for f=1:min(size(Dades_Tipus_Pd))
    for ins=1:temps
        b=ins-1;
        Tipus_Pd(f,ins)=0;
        Tipus_Qd(f,ins)=0;
        for cont=1:60
            Tipus_Pd(f,ins)=Tipus_Pd(f,ins)+Dades_Tipus_Pd(f,b*60+cont);
            Tipus_Qd(f,ins)=Tipus_Qd(f,ins)+Dades_Tipus_Qd(f,b*60+cont);
        end
    end
end
end
Tipus_Pd=Tipus_Pd/60;
Tipus_Qd=Tipus_Qd/60;
for s=1:min(size(Tipus_Pd))
    for i=1:length(Tipus_habitatge)
        if s==Tipus_habitatge(i)
            for t=1:temps
                Pd(i,t)=Tipus_Pd(s,t);
                Qd(i,t)=Tipus_Qd(s,t);
            end
        end
    end
end
for i=length(Tipus_habitatge)+1:NumeroNusos
    for t=1:temps
        Pd(i,t)=0;
        Qd(i,t)=0;
    end
end
for t=1:temps
    aux=0;
    aux1=0;
    for i=1:NumeroNusos
        aux=aux+Pd(i,t);
        aux1=aux1+Qd(i,t);
    end
    PdTotal(t)=aux;
    QdTotal(t)=aux1;
end
PdTotal=PdTotal/Sbase;%pas a pu
dlmwrite('PdTotal.txt', PdTotal, ' ')
QdTotal=QdTotal/Sbase;%pas a pu
dlmwrite('QdTotal.txt', QdTotal, ' ')
%CONSTRUCCIÓ VECTOR PREU
%preu marginal mercat energia €/MWh (preu per cada hora)
Preu=xlsread('Preu','Sheet1','B5:Y5');
dlmwrite('Preu.txt', Preu, ' ')
%CAPACITAT BATERIA
CapacitatBAT=Renv_inst*3/Sbase;
dlmwrite('CapacitatBAT.txt', CapacitatBAT, ' ')

```

E2. Fitxer *Matlab* per la preparació de dades per a aplicar el model desagregat instantani al cas d'estudi

Tot seguit es presenta el codi elaborat amb *Matlab* per a preparar les dades a utilitzar pel fitxer *Julia* del model desagregat instantani:

```
clear all
close all
clc
%introducció de dades
NumeroNusos=65;
Penetracio=xlsread('Perfils','Penetració generació','C18');
temps=24;
rendPV=xlsread('Perfils','Panells','C50');
Escenari_radiacio=xlsread('Perfils','Radiació dades','B6');
Escenari_vent=xlsread('Perfils','Vent dades','B6');
BusTrafc=63;
Sbase=xlsread('Branch_4','Modificar aquí','B5')*1000000;
Vbase=xlsread('Branch_4','Modificar aquí','B4')*1000;
Zbase=Vbase^2/Sbase;
%CONSTRUCCIÓ MATRIU Ybus
From=xlsread('Branch_4','Modificar aquí','E3:E66');
To=xlsread('Branch_4','Modificar aquí','F3:F66');
colreal=xlsread('Branch_4','Modificar aquí','W3:W66');
colimaginari=xlsread('Branch_4','Modificar aquí','X3:X66');
Long=length(From);
temps=24;
Y(:)=colreal(:)+1j*colimaginari(:);
for i=1:NumeroNusos
    for j=1:NumeroNusos
        Ybus(i,j)=0;
        for k=1:Long
            if ((From(k)==i) && (To(k)==j)) || ((From(k)==j) && (To(k)==i))
                Ybus(i,j)=-Y(k);
            end
        end
    end
end
for d=1:NumeroNusos
    Ybus(d,d)=0;
    for k=1:Long
        if ((From(k)==d) || (To(k)==d))
            Ybus(d,d)=Ybus(d,d)+Y(k);
        end
    end
end
G=real(Ybus);
B=imag(Ybus);
dlmwrite('B.txt', B, ' ');
dlmwrite('G.txt', G, ' ');
%CONSTRUCCIÓ MATRIU Pgmax
VectorPenetracioDades=xlsread('Perfils','Penetració generació','L4:L15');
Tipus_habitatge=xlsread('Perfils','Distribució cases','D3:D64');
for i=1:length(Tipus_habitatge) %vector de penetració d'acord amb configuració
    VectorPenetracio(i)=0;
    for j=1:length(VectorPenetracioDades)
        if Tipus_habitatge(i)==j
            VectorPenetracio(i)=VectorPenetracioDades(j);
        end
    end
end
VectorSuperficieDades=xlsread('Perfils','Penetració generació','R4:R15');
for i=1:length(Tipus_habitatge) % vector superfície d'acord amb configuració
    VectorSuperficie(i)=0;
    for j=1:length(VectorSuperficieDades)
        if Tipus_habitatge(i)==j
            VectorSuperficie(i)=VectorSuperficieDades(j);
        end
    end
end
for i=length(VectorSuperficie)+1:NumeroNusos
    VectorSuperficie(i)=-1;
end
```

```

end
DadesRadiacio1=xlsread('Perfiles','Radiació dades','H6:H101');
DadesRadiacio2=xlsread('Perfiles','Radiació dades','M6:M101');
DadesRadiacio3=xlsread('Perfiles','Radiació dades','R6:R101');
DadesPaerogenerador1=xlsread('Perfiles','Vent dades','I6:I101');
DadesPaerogenerador2=xlsread('Perfiles','Vent dades','Y6:Y101');
DadesPaerogenerador3=xlsread('Perfiles','Vent dades','AG6:AG101');
%escenari radiació correcte?
validacioPV=1;
if Escenari_radiacio==1
    escRad=DadesRadiacio1;
else
    if Escenari_radiacio==2
        escRad=DadesRadiacio2;
    else
        if Escenari_radiacio==3
            escRad=DadesRadiacio3;
        else
            disp('Escenari radiació incorrecte')
            validacio=0;
        end
    end
end
end
%escenari vent correcte?
validacioW=1;
if Escenari_vent==1
    escA=DadesPaerogenerador1;
else
    if Escenari_vent==2
        escA=DadesPaerogenerador2;
    else
        if Escenari_vent==3
            escA=DadesPaerogenerador3;
        else
            disp('Escenari vent incorrecte')
            validacioW=0;
        end
    end
end
end
for ins=1:temps
    b=ins-1;
    Radiacio(ins)=0;
    Paerogenerador(ins)=0;
    for cont=1:4
        Radiacio(ins)=Radiacio(ins)+escRad(b*4+cont);
        Paerogenerador(ins)=Paerogenerador(ins)+escA(b*4+cont);
    end
end
Radiacio=Radiacio/4;
Paerogenerador=Paerogenerador/4;
if validacioPV==1 && validacioW==1
    for i=1:length(VectorPenetracio) % bus hi ha generador operant?
        GeneradorConnectat(i)=0;
        if VectorPenetracio(i)<=Penetracio
            GeneradorConnectat(i)=1;
        end
    end
    for i=1:NumeroNusos % vector de Pgmax per les plaques
        for t=1:temps
            Pgmax_FV(i,t)=0;
            if VectorSuperficie(i)>0
                Pgmax_FV(i,t)=Radiacio(t)*VectorSuperficie(i)*GeneradorConnectat(i)*rendPV;
            end
        end
    end
    for i=1:NumeroNusos
        for t=1:temps
            Pgmax_W(i,t)=0;
            if VectorSuperficie(i)==0
                Pgmax_W(i,t)=Paerogenerador(t)*GeneradorConnectat(i);
            end
        end
    end
end

```

```

end
Pgmax=Pgmax_FV+Pgmax_W;
for t=1:temps
    Pgmax(64,t)=100*Sbase;
end
Pentra=load('matriuPentra.txt');
for t=1:temps
    Pgmax(BusTrafo,t)=Pentra(t)*Sbase;
end
Pgmax=Pgmax/Sbase;
dlmwrite('Pgmax.txt', Pgmax, ' ')
end
%CONSTRUCCIÓ MATRIU Pd i Qd
Dades_Tipus_Pd=xlswread('Perfiles','Perfil Consum','C2:BCL13');
Dades_Tipus_Qd=xlswread('Perfiles','Perfil Consum','C17:BCL28');
for f=1:min(size(Dades_Tipus_Pd))
    for ins=1:temps
        b=ins-1;
        Tipus_Pd(f,ins)=0;
        Tipus_Qd(f,ins)=0;
        for cont=1:60
            Tipus_Pd(f,ins)=Tipus_Pd(f,ins)+Dades_Tipus_Pd(f,b*60+cont);
            Tipus_Qd(f,ins)=Tipus_Qd(f,ins)+Dades_Tipus_Qd(f,b*60+cont);
        end
    end
end
Tipus_Pd=Tipus_Pd/60;
Tipus_Qd=Tipus_Qd/60;
for s=1:min(size(Tipus_Pd))
    for i=1:length(Tipus_habitatge)
        if s==Tipus_habitatge(i)
            for t=1:temps
                Pd(i,t)=Tipus_Pd(s,t);
                Qd(i,t)=Tipus_Qd(s,t);
            end
        end
    end
end
for i=length(Tipus_habitatge)+1:NumeroNusos
    for t=1:temps
        Pd(i,t)=0;
        Qd(i,t)=0;
    end
end
Psurt=load('matriuPsurt.txt');
for t=1:temps
    Pd(BusTrafo,t)=Psurt(t)*Sbase;
end
Pd=Pd/Sbase;
dlmwrite('Pd.txt', Pd, ' ')
Qd=Qd/Sbase;
dlmwrite('Qd.txt', Qd, ' ')
%Sn inversor busos fotovoltaica
PN_FV=xlswread('Perfiles','Penetració generació','G4:G15');
for i=1:length(Tipus_habitatge)
    Sn(i)=0;
    for j=1:length(VectorPenetracioDades)
        if Tipus_habitatge(i)==j
            Sn(i)=PN_FV(j)*GeneradorConnectat(i);
        end
    end
end
dlmwrite('MatriuSn.txt', Sn, ' ')
%CREACIÓ MATRIU i VECTOR NUL-L
for t=1:temps
    BaseV(t)=0;
    for i=1:NumeroNusos
        Base(i,t)=0;
    end
end
dlmwrite('MatriuBaseGran.txt', Base, ' ')
dlmwrite('VectorBase.txt', BaseV, ' ')

```

E3. Model agregat predictiu pel cas d'estudi aplicat amb *Julia*

Tot seguit es presenta el codi realitzat amb *Julia* per a aplicar el model agregat predictiu desenvolupat a la xarxa d'estudi:

```
using JuMP
using Cbc
PdTotal=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/PdTotal.txt")
PgmaxTotal=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/PgmaxTotal.txt")
Preu=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/Preu.txt")
temps=24;
Dt=1;
CapacitatBAT=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/CapacitatBAT.txt")
EstatBATinicial=0;
rendBATc=0.9;
rendBATd=0.9;
m = Model(solver=CbcSolver())
#VARIABLES
@defVar(m, PgTotal[1:temps]>=0)
@defVar(m, Pentra[1:temps]>=0)
@defVar(m, Psurt[1:temps]>=0)
@defVar(m, PbTotal[1:temps])
@defVar(m, EstatBAT[1:temps])
@defVar(m, Pbcarrega[1:temps]>=0)
@defVar(m, Pbdescarrega[1:temps]>=0)
@defVar(m, a[1:temps], Bin)
@defVar(m, b[1:temps], Bin)
#OBJECTIU
@setObjective(m, Min, sum{Psurt[t]*Dt+Pentra[t]*Dt*Preu[t]-Pbcarrega[t]*Dt+
Pbdescarrega[t]*Dt*2-a[t]/10, t=1:temps})#minimitza dependència energètica
#RESTRICCIONS
#@addConstraint(m, sort, sum{Psurt[t], t=1:temps}<=sum{PgTotal[t], t=1:temps}-
sum{PdTotal[t], t=1:temps})
@defConstrRef suCons[1:temps]
for t= 1:temps
    suCons[t] = @addConstraint(m, 0==PgTotal[t]-PdTotal[t]+PbTotal[t]+Pentra[t]-Psurt[t])
end
@defConstrRef juCons[1:temps] #potencia generada menor a potencia generada màxima
for t = 1:temps
    juCons[t] = @addConstraint(m, PgTotal[t] <=PgmaxTotal[t])
end
@defConstrRef sdCons[1:temps] #potencia generada menor a potencia generada màxima
for t = 1:temps
    sdCons[t] = @addConstraint(m, PbTotal[t] ==Pbdescarrega[t]-Pbcarrega[t])
end
@addConstraint(m, principi, EstatBAT[1]==EstatBATinicial-(Pbdescarrega[1]/rendBATd-
Pbcarrega[1]*rendBATc)*Dt)
@defConstrRef iuCons[2:temps]#potencia generada menor a potencia generada màxima
for t = 2:temps
    iuCons[t] = @addConstraint(m, EstatBAT[t]==EstatBAT[t-1]-(Pbdescarrega[t]/rendBATd-
Pbcarrega[t]*rendBATc)*Dt)
end
@defConstrRef bhCons[1:temps]
for t=1:temps
    bhCons[t] = @addConstraint(m, 0<=EstatBAT[t]<=CapacitatBAT[1])
end
@defConstrRef psCons[1:temps] #potencia generada menor a potencia generada màxima
for t = 1:temps
    psCons[t] = @addConstraint(m, Pbcarrega[t]<=a[t]*4000)
end
@defConstrRef dpsCons[1:temps] #potencia generada menor a potencia generada màxima
for t = 1:temps
    dpsCons[t] = @addConstraint(m, Pbdescarrega[t]<=(1-a[t])*4000)
end
@defConstrRef pentrCons[1:temps] #potencia generada menor a potencia generada màxima
for t = 1:temps
    pentrCons[t] = @addConstraint(m, Pentra[t]<=b[t]*4000)
end
end
```

```

@defConstrRef surtCons[1:temps] #potencia generada menor a potencia generada màxima
  for t = 1:temps
    surtCons[t] = @addConstraint(m, Psurt[t]<=(1-b[t])*4000)
  end
#SOLUCIÓ
solve(m)
MATRIUPbcarrega=getValue(Pbcarrega[1:temps])
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/matriuPbcarrega.txt",MATRIUPbcarrega)
MATRIUPbdescarrega=getValue(Pbdescarrega[1:temps])
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/matriuPbdescarrega.txt",MATRIUPbdescarrega)
MATRIUPbBinari=getValue(a[1:temps])
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/matriuPbBinari.txt",MATRIUPbBinari)
MATRIUPentra=getValue(Pentra[1:temps])
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/matriuPentra.txt",MATRIUPentra)
MATRIUPsurt=getValue(Psurt[1:temps])
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/matriuPsurt.txt",MATRIUPsurt)
MATRIUPgTotal=getValue(PgTotal[1:temps])
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/matriuPg.txt",MATRIUPgTotal)

```

E4. Model desagregat instantani pel cas d'estudi aplicat amb *Julia*

En aquest apartat es presenta el codi realitzat amb *Julia* per a aplicar el model desagregat instantani desenvolupat a la xarxa d'estudi:

```
using JuMP
using Ipopt
DadesPd=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/Pd.txt")
DadesQd=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/Qd.txt")
DadesPgmax=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/Pgmax.txt")
G=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/G.txt") #part real matriu Ybus
B=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/B.txt") #part imaginari matriu Ybus
DiaPbcarrega=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/matriuPbcarrega.txt")
DiaPbdescarrega=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/matriuPbdescarrega.txt")
Sn=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MatriuSn.txt")
CapacitatBAT=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/CapacitatBAT.txt")
BinPb=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/matriuPbBinari.txt")
MATRIUP=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MatriuBaseGran.txt")
MATRIUQ=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MatriuBaseGran.txt")
MATRIUV=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MatriuBaseGran.txt")
MATRIUangle=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MatriuBaseGran.txt")
MATRIUQg=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MatriuBaseGran.txt")
MATRIUPg=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MatriuBaseGran.txt")
MATRIUPbcarregaHora=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/VectorBase.txt")
MATRIUPbdescarregaHora=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/VectorBase.txt")
MATRIUEstatBATERIA=readdlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/VectorBase.txt")
Dt=1
aux=0
rendBATc=0.9;
rendBATd=0.9;
NumeroNusos=65
temps=24
for t=1:temps
    m = Model(solver=IpoptSolver(max_iter=400000))
    #VARIABLES
    @defVar(m, V[1:NumeroNusos]>=0.7) #tensió al bus
    @defVar(m, delta[1:NumeroNusos]) #angle(rad) al bus
    @defVar(m, P[1:NumeroNusos]) #potencia activa injectada al bus
    @defVar(m, Q[1:NumeroNusos]) #potencia reactiva injectada al bus
    @defVar(m, Qg[1:NumeroNusos]) #potencia generada bateria
    @defVar(m, Qd[1:NumeroNusos]) #potencia generada bateria
    @defVar(m, Pg[1:NumeroNusos]>=0) #potencia generada bateria
    @defVar(m, Pd[1:NumeroNusos]>=0) #potencia generada bateria
    @defVar(m, vabs[1:NumeroNusos])
    @defVar(m, Pbcarrega>=0)
    @defVar(m, Pbdescarrega>=0)
    @defVar(m, EstatBATERIA>=0)
    #OBJECTIU
    @setNLObjective(m, Min, 300*sum{vabs[i], i=1:NumeroNusos} + Pg[64] -Pbcarrega/2
    +Pbdescarrega/2 ) #minimitza dependència energètica
    #RESTRICCIONS
    @addNLConstraint(m, Pconstr[i=1:NumeroNusos], P[i] ==
    V[i]*sum{V[k]*(G[i,k]*cos(delta[i]-delta[k])+B[i,k]*sin(delta[i]-delta[k])),
    k=1:NumeroNusos})
    @addNLConstraint(m, Qconstr[i=1:NumeroNusos], Q[i] ==
    V[i]*sum{V[k]*(G[i,k]*sin(delta[i]-delta[k])-B[i,k]*cos(delta[i]-delta[k])),
    k=1:NumeroNusos})
    @addNLConstraint(m, tr[i=1:NumeroNusos], vabs[i]==(1-V[i])^2)
    @defConstrRef usuCons[1:NumeroNusos]
    for i = 1:NumeroNusos
        usuCons[i] = @addConstraint(m, Pd[i]==DadesPd[i,t])
    end
    @defConstrRef vbCons[1:NumeroNusos]
    for i = 1:NumeroNusos
        vbCons[i] = @addConstraint(m, Qd[i]==DadesQd[i,t])
    end
    @defConstrRef suCons[1:NumeroNusos-2]
    for i = 1:NumeroNusos-2
        suCons[i] = @addConstraint(m, P[i]==Pg[i]-Pd[i])
    end
end
```

```

@defConstrRef n1Cons[1:NumeroNusos]
for i = 1:NumeroNusos
    n1Cons[i] = @addConstraint(m, Q[i]==Qg[i]-Qd[i])
end
#BUS 63 (trafo)
    @addConstraint(m, cas, Pg[63]<=DadesPgmax[63,t])
    @addConstraint(m, te, P[63]^2+Q[63]^2<=630^2)
#BUS 64 (Bateries+G.diesel)
    @addConstraint(m, a, P[64]==Pg[64]-Pbcarrega+Pbdescarrega-Pd[64])
    @addConstraint(m, lo, Pg[64]<=DadesPgmax[64,t])
    @addConstraint(m, plo, (Pbcarrega-Pbdescarrega)^2+Q[64]^2<=(CapacitatBAT[1])^2)
    @addConstraint(m, loq, EstatBATERIA==aux+(Pbcarrega*rendBATc-
Pbdescarrega/rendBATd)*Dt)
    @addNLConstraint(m, oi, Pbdescarrega<=(1-BinPb[t])*CapacitatBAT[1])
    @addConstraint(m, adfs, Pbcarrega<=BinPb[t]*CapacitatBAT[1])
    @addConstraint(m, est, 0<=EstatBATERIA<=CapacitatBAT[1])
#BUS 65
    @addConstraint(m, a2, Qg[65]==0)
    @addConstraint(m, lo2, Pg[65]<=DadesPgmax[65,t])
    @addConstraint(m, per, P[65]==Pg[65]-Pd[65])
#BUSOS FOTOVOLTAIC: reactiva i activa màxima generada (bus 1 a 24/ bus 33 a 61)
@defConstrRef opCons[1:24]
for i = 1:24
    opCons[i] = @addConstraint(m, Pg[i]<=DadesPgmax[i,t])
end
@defConstrRef ipCons[33:61]
for i = 33:61
    ipCons[i] = @addConstraint(m, Pg[i]<=DadesPgmax[i,t])
end
@defConstrRef qopCons[1:24]
for i = 1:24
    opCons[i] = @addConstraint(m, Pg[i]^2+Qg[i]^2<=Sn[i]^2)
end
@defConstrRef qipCons[33:61]
for i = 33:61
    ipCons[i] = @addConstraint(m, Pg[i]^2+Qg[i]^2<=Sn[i]^2)
end
#BUSOS AEROGENERADORS: (bus 25 a 32/ bus 62)
@defConstrRef aerCons[25:32]
for i = 25:32
    aerCons[i] = @addConstraint(m, Pg[i]<=DadesPgmax[i,t])
end
@addConstraint(m, rea, Pg[62]<=DadesPgmax[62,t])
@defConstrRef hssuCons[25:32]
for i = 25:32
    hssuCons[i] = @addConstraint(m, Qg[i]==0.1*Pg[i])
end
@addConstraint(m, re, Qg[62]==0.1*Pg[62])
solve(m) #SOLUCIONAR
#ASSIGNACIÓ DELS VALORS OBTINGUTS
aux=getValue(EstatBATERIA)
MATRIUP[:,t]=getValue(P[1:NumeroNusos])
MATRIUQ[:,t]=getValue(Q[1:NumeroNusos])
MATRIUV[:,t]=getValue(V[1:NumeroNusos])
MATRIUangle[:,t]=getValue(delta[1:NumeroNusos])
MATRIUQg[:,t]=getValue(Qg[1:NumeroNusos])
MATRIUPg[:,t]=getValue(Pg[1:NumeroNusos])
MATRIUPbcarregaHora[t]=getValue(Pbcarrega)
MATRIUPbdescarregaHora[t]=getValue(Pbdescarrega)
MATRIUEstatBATERIA[t]=getValue(EstatBATERIA)
end
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MATRIUP.txt",MATRIUP)
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MATRIUQ.txt",MATRIUQ)
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MATRIUV.txt",MATRIUV)
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MATRIUDELT.txt",MATRIUangle)
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MATRIUQg.txt",MATRIUQg)
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MATRIUPg.txt",MATRIUPg)
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MATRIUPbcarregaHora.txt",MATRIUPbcarregaHora)
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MATRIUPbdescarregaHora.txt",MATRIUPbdescarregaHo
ra)
writedlm("C:/Users/Usuario/Desktop/TFG/NOU/MATRIUEstatBATERIA.txt",MATRIUEstatBATERIA)

```


E5. Fitxer *Matlab* per a la representació dels resultats

A continuació es presenta el codi elaborat amb *Matlab* pel tractament i representació dels resultats obtinguts:

```
clear all
clc
Tensio=dlmread('MATRIUV.txt');
Pgeneracio=dlmread('MATRIUPg.txt');
Pdemanda=dlmread('Pd.txt');
Pdemanda_total=dlmread('PdTotal.txt');
Qdemanda_total=dlmread('QdTotal.txt');
Pgmaxim=dlmread('Pgmax.txt');
Pgmaxim_total=dlmread('PgmaxTotal.txt');
Pbus=dlmread('MATRIUP.txt');
Qgenerada=dlmread('MATRIUQg.txt');
Pbcarrega=dlmread('MATRIUPbcarregaHora.txt');
Pbdescarrega=dlmread('MATRIUPbdescarregaHora.txt');
EstatBATERIA=dlmread('MATRIUEstatBATERIA.txt');
CapacitatBATERIA=dlmread('CapacitatBAT.txt');
Pbateries=-(Pbcarrega-Pbdescarrega);
temps=24;
n=1:temps;
NumeroNusos=65;
%gràfica demanda total potencia activa
figure(1)
bar(Pdemanda_total,1,'b')
ax=gca;
ax.XTick=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24]
xlim([0 25])
grid on
grid minor
xlabel('t [h]')
ylabel('P [kW]')
title('Consum total de potència activa')
%valor mínim i màxim de tensió. Mitja de tensió.
sumMaxV=0;
sumMinV=0;
sumMitjV=0;
for t=1:temps
    MinV(t)=min(Tensio(:,t));
    MaxV(t)=max(Tensio(:,t));
    sum=0;
    for i=1:NumeroNusos
        sum=sum+Tensio(i,t);
    end
    MitjV(t)=sum/NumeroNusos;
    sumMaxV=sumMaxV+MaxV(t);
    sumMinV=sumMinV+MinV(t);
    sumMitjV=sumMitjV+MitjV(t);
end
Vmax=max(MaxV(:));
Vmin=min(MinV(:));
MaxVTotal=sumMaxV/temps;
MinVTotal=sumMinV/temps;
MitjVTotal=sumMitjV/temps;
pe=0;
for t=1:temps
    coef=0;
    for i=1:NumeroNusos
        coef=coef+(Tensio(i,t)-1)^2;
    end
    desv(t)=(1/temps*coef)^1/2;
    pe=pe+desv(t);
end
DESV=pe/temps;
GdieselTotal=0;
for t=1:temps
    Gdiesel(t)=Pgeneracio(64,t);
    GdieselTotal=GdieselTotal+Gdiesel(t);
end
XPTotal=0;
for t=1:temps
    XP(t)=Pgeneracio(63,t);
```

```

    XPTotal=XPTotal+XP(t);
end
NoRENOVABLE=GdieselTotal+XPTotal;
PerduesTotal=0;
for t=1:temps
    Perdues(t)=0;
    for i=1:65
        Perdues(t)=Perdues(t)+Pbus(i,t);
    end
    PerduesTotal=Perdues(t)+PerduesTotal;
end
figure(2)
bar(Perdues,1,'r')
ax=gca;
ax.XTick=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24]
xlim([0 25])
ylim([0 18])
grid on
xlabel('t [h]')
ylabel('P [kW]')
title('Pèrdues a la xarxa')
figure(3)
bar(Qdemanda_total,1,'m')
ax=gca;
ax.XTick=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24]
xlim([0 25])
ylim([0 16])
grid on
grid minor
xlabel('t [h]')
ylabel('Q [kVAx]')
title('Consum total de potència reactiva')
for t=1:temps
    SOC(t)=EstatBATERIA(t)*100/CapacitatBATERIA;
end
figure(4)
bar(SOC,1,'g')
ax=gca;
ax.XTick=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24]
xlim([0 25])
ylim([0 100])
grid on
grid minor
xlabel('t [h]')
ylabel('%')
for t=1:temps
    Pgren(t)=0;
    PgMAXren(t)=Pgmaxim_total(t);
    for i=1:62
        Pgren(t)=Pgren(t)+Pgeneracio(i,t);
    end
end
for t=1:temps
    auxGra(t,1)=XP(t);
    auxGra(t,2)=Gdiesel(t);
    auxGra(t,3)=Pgren(t);
    auxGra(t,4)=Pbdescarrega(t);
end
figure(5)
bar(auxGra,1,'stacked')
ax=gca;
ax.XTick=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24]
xlim([0 25])
ylim([0 170])
grid on
grid minor
xlabel('t [h]')
ylabel('P [kW]')
title('Generació de potència activa')
legend('xarxa','Gdiesel','renovable','Bateria')
for t=1:temps
    auxGral(t,1)=Pdemanda_total(t);

```

```

    auxGral(t,2)=Pbcarrega(t);
    auxGral(t,3)=0;
    auxGral(t,4)=Perdues(t);
end
figure(6)
bar(auxGral,1,'stacked')
ax=gca;
ax.XTick=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24]
xlim([0 25])
ylim([0 170])
grid on
grid minor
xlabel('t [h]')
ylabel('P [kW]')
title('Despesa de potència activa')
legend('Consum','Càrrega bateria','Injecció a la xarxa principal','Pèrdues')
QgT=0;
for t=1:temps
    Qg(t)=0;
    for i=1:NumeroNusos
        Qg(t)=Qgenerada(i,t)+Qg(t);
    end
    QgT=QgT+Qg(t);
end
figure(7)
bar(Qg,1,'stacked')
ax=gca;
ax.XTick=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24]
xlim([0 25])
ylim([0 16])
grid on
grid minor
xlabel('t [h]')
ylabel('Q [kVAr]')
title('Potència reactiva generada')
ant=0;
nV=0;
for i=1:NumeroNusos
    sm=0;
    for t=1:temps
        bl(i,t)=abs(1-Tensio(i,t));
        sm=bl(i,t)+sm;
    end
    if sm>ant
        V=Tensio(i,:);
        nV=i;
        bus=i;
    end
    ant=sm;
end
V(25)=V(24);
figure(8)
stairs(V)
ax=gca;
ax.XTick=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24]
xlim([1 25])
ylim([0.8 1.2])
grid on
grid minor
xlabel('t [h]')
ylabel('V [pu]')
title('Tensió')

```